Ministry of Education and Science of Ukraine
Cherkasy State Technological University (Ukraine)
Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Ukraine)
Institute of Information Technologies and Systems of the NAS of Ukraine
Institute for Digitalisation of Education of the NAES of Ukraine
National University “Kyiv Aviation Institute”
Kharkiv National University of Radio Electronics (Ukraine)
V. N. Karazin Kharkiv National University
Odesa Polytechnic National University
Dragomanov Ukrainian State University (Ukraine)
Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University (Ukraine)
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University (Ukraine)
Technische Universität Berlin (Germany)
Lublin University of Technology (Poland)
Norwegian University of Science and Technology (Norway)
Universidade Aberta (Portugal)
Tallinn University (Estonia)
Anadolu University (Türkiye)
Luigj Gurakuqi University of Shkodër (Albania)
International Information Technology University JSC (Kazakhstan)

# CONFERENCE PROCEEDINGS

## of the VIII International Scientific-Practical Conference "Information Technology for Education, Science and Technics" (ITEST-2026)

**June 24-25, 2026**

**Cherkasy 2026**

**UDK 004:37:001:62**

**Conference proceedings of the VIII International Scientific-Practical Conference "Information Technology for Education, Science and Technics" (ITEST-2026),** (Cherkasy, June 24-25, 2026). Cherkasy: ChSTU, 2026. 798 p.

The proceedings include papers on the main directions in development of information technologies and systems and their use in education, science, technology, management and economics.

The materials consider issues related to computer modeling of physical, chemical and economic processes, information security, and the use of information and communication technologies and artificial intelligence in engineering, scientific research and complex systems control, as well as the use of information technologies in education, creation, implementation, scientific and educational resources at the universites.

For researchers, teachers, graduate students and university students.

**Editorial board:**

Prof., Dr. *E. Faure* (head)
Prof., Dr. *C. Bazilo*
Prof., Dr. *M. Bondarenko*
Prof., Dr. *O. Danchenko*
Prof., Dr. *K. Kolesnikova*
Prof., Dr. *Ye. Fedorov*
Prof., Dr. *V. Halchenko*
Prof., Dr. *S. Holub*
Prof., Dr. *T. Prokopenko*
Prof., Dr. *V. Palahin*
Prof., Dr. *V. Romanuke*
Prof., Dr. *V. Solovyev*
Prof., Dr. *Y. Teslia*
Prof., Dr. *R. Trembovetska*
Prof., Dr. *Y. Tryus* (editor)
Docent, PhD. *A. Chepynoga*
Docent, PhD. *H. Zaspa*

Published in accordance with the decision of the Scientific and Technical Council of Cherkasy State Technological University dated June 22, 2026, protocol No. 3.

The materials are presented in the author's edition. The authors of the published materials are fully responsible for the selection, accuracy of given facts, quotations, data, proper names, references, literacy, literary style and other information. The editorial board reserves the right to shorten and edit submitted materials. Manuscripts are not returned. Conference organizers and members of the editorial board do not always share the opinions of the authors.

**Information partners of the conference:** Council of Young Scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine, Cherkasy Scientific-Research Expert Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine.

© Authors of the Papers, 2026

**Міністерство освіти і науки України**
**Черкаський державний технологічний університет**
**Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу»**
**НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»**
**Інститут інформаційних технологій і систем НАН України**
**Інститут цифровізації освіти НАПН України**
**Національний університет «Київський авіаційний інститут»**
**Харківський національний університет радіоелектроніки**
**Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**
**Національний університет «Одеська політехніка»**
**Український державний університет імені Михайла Драгоманова**
**Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького**
**Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка**
**Берлінський технічний університет (Німеччина)**
**Люблінська політехніка (Польща)**
**Норвезький університет науки і технологій (Норвегія)**
**Відкритий університет (Португалія)**
**Талліннський університет (Естонія)**
**Університет Анадолу (Туреччина)**
**Шкодерський університет імені Луіджі Гуракучі (Албанія)**
**Міжнародний університет інформаційних технологій (Казахстан)**

# ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ

## VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2026)

**24-25 червня 2026 року**

**Черкаси 2026**

**УДК 004:37:001:62**

**Тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2026)**, (Черкаси, 24-25 червня 2026 р.) [Електронний ресурс]. Черкаси : ЧДТУ, 2026. 798 с.

Матеріали конференції висвітлюють основні напрями розвитку інформаційних технологій і систем та їх використання в освіті, науці, техніці, управлінні та економіці.

У матеріалах розглядаються питання, пов'язані з комп'ютерним моделюванням фізичних, хімічних і економічних процесів, інформаційною безпекою та застосуванням інформаційно-комунікаційних технологій та штучного інтелекту в техніці, наукових дослідженнях і управлінні складними системами, а також з використанням інформаційних технологій в освіті, зі створенням, впровадженням і використанням науково-освітніх ресурсів у закладах вищої освіти.

Для наукових і педагогічних працівників, аспірантів і студентів закладів вищої освіти.

**Редакційна колегія:**

*Фауре Е. В*., доктор технічних наук, професор (*голова*)
*Базіло К. В*., доктор технічних наук, професор
*Бондаренко М. О.,* доктор технічних наук, професор
*Гальченко В. Я.,* доктор технічних наук, професор
*Голуб С. В.,* доктор технічних наук, професор
*Данченко О. Б.,* доктор технічних наук, професор
*Колеснікова К. В.,* доктор технічних наук, професор
*Прокопенко Т. М*., доктор технічних наук, професор
*Палагін В. В.,* доктор технічних наук, професор
*Романюк В. В*., доктор технічних наук, професор
*Соловйов В. М*., доктор фізико-математичних наук, професор
*Тесля Ю. М*., доктор технічних наук, професор
*Трембовецька Р. В*., доктор технічних наук, професор
*Триус Ю. В*., доктор педагогічних наук, професор (*відповідальний редактор*)
*Федоров Є. Є.,* доктор технічних наук, професор
*Заспа Г. О.,* доцент, кандидат технічних наук
*Чепинога А. В.,* доцент, кандидат технічних наук

Публікується згідно з рішенням Науково-технічглї ради Черкаського державного технологічного університету від 22.06.2026 р., протокол № 3.

Матеріали подані в авторській редакції. Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, даних, власних імен, посилань, грамотність, літературний стиль та інші відомості. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали. Рукописи не повертаються. Організатори конференції та члени редколегії не завжди поділяють думки авторів.

**Інформаційні партнери конференції:** Рада молодих вчених НАН України, Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України.

© Автори публікацій, 2026

# BRIEF CONTENTS

**A.** Theoretical and practical aspects for creating information technology and systems…….. 6
**B.** Information technology in engineering and robotics…….. 39
**C.** Information technology and artificial intelligence…….. 114
**D.** Information, communication, and cloud technology…….. 259
**E.** Information security…… 276
**F.** Information technology for modeling complex processes and systems……... 334
**G.** Information technology in management and economics……. 458
**H.** Information technology in research……... 632
**I.** Information technology in higher education……. 679
**Contents** …… 776

# КОРОТКИЙ ЗМІСТ

**A.** Теоретичні та практичні аспекти розробки інформаційних технологій і систем…… 6
**B.** Інформаційні технології в інженерії та робототехніці……... 39
**C.** Інформаційні технології та штучний інтелект…… 114
**D.** Інформаційнокомунікаційні та хмарні технології……. 259
**E.** Безпека інформаційних технологій……. 276
**F.** Інформаційні технології моделювання складних процесів і систем……. 334
**G.** Інформаційні технології в управлінні та економіці……... 458
**H.** Інформаційні технології в наукових дослідженнях……... 632
**I.** Інформаційні технології у вищій освіті……... 679
**Зміст**…… 776

# FROM SCENARIO TO ARCHITECTURE: AN INFORMATION TECHNOLOGY FOR IOT PATTERN PORTFOLIO SYNTHESIS

**Chumachenko D., Liubchenko V.**
Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

**Abstract.** The paper presents an information technology (IT) for supporting the synthesis of architectural pattern portfolios in Internet of Things systems. The proposed IT connects seven sequential stages — scenario formalization, candidate generation, feasibility filtering, multi-criteria evaluation, Pareto filtering, compromise selection, and reproducible artifact export — into a single controlled workflow. Each IoT architecture is represented as a portfolio of pattern-layer pairs over the Edge-Fog-Cloud hierarchy, and quality is evaluated by a vector of non-functional criteria with layer-responsibility weighting to eliminate inter-layer double-counting. Experimental validation on two domains, infrastructure monitoring and control (Exp1) and bionic prosthesis software (Exp2), produced Pareto sets of 510 and 144 non-dominated portfolios respectively, with compromise utility scores U = 0.633 and U = 0.649. The technology produces machine-readable artifacts that make the architectural decision traceable and reproducible.
**Keywords:** Internet of Things; software architecture; architectural patterns; Edge-Fog-Cloud; portfolio synthesis; Pareto front; decision support; reproducibility.

**Introduction**. Modern IoT systems combine heterogeneous edge devices, fog gateways, and cloud infrastructure. The Edge-Fog-Cloud hierarchy itself was motivated by Bonomi et al. [1], who argued that low latency, geographical distribution, and mobility require fog-level processing alongside the cloud, and was further developed by Shi et al. [2], who positioned edge computing as the natural locus for response-time-critical and privacy-sensitive workloads. Their software architecture must satisfy conflicting non-functional requirements (NFRs) — responsiveness, security, reliability, scalability, and energy efficiency — under resource, connectivity, and budget constraints. The fact that these criteria genuinely trade off against one another places the problem in the multi-objective optimisation regime, for which non-dominated sorting (NSGA-II) [3] is the canonical reference for producing Pareto-optimal sets rather than single weighted-sum optima. Prior work in the IoT-architecture line introduced a quality model for IoT software [4], a systematic pattern-selection approach based on a 26-pattern catalog and weighted-sum ranking [5], a seven-step method with a Layers×Issues matrix to eliminate double-counting [6], and a multi-objective integer linear programming model (MOILP) that produces a Pareto set of non-dominated pattern portfolios [7]. A further extension introduced the layer-responsibility matrix W, which distributes quality-criterion responsibility across Edge, Fog, and Cloud, thereby correcting score inflation in additive multi-layer models [8].

Despite these advances, the chain from scenario description to a justified, reproducible architectural recommendation has not been formalised as a complete information technology: reproducing the experiments in [7] requires manually coordinating six independent steps with no enforced data contracts between them, leaving the process error-prone and non-transferable. The present paper addresses this gap by defining an IT that operationalises all the above formal models in a single sequential workflow.

**Problem statement**. Let $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$ denote a catalog of N architectural patterns, L = {Edge, Fog, Cloud} the layer set, and C a scenario model that encodes the domain context, quality criteria K, criticality flags, contribution profiles, compatibility and dependency constraints, and budget bounds. An architectural alternative is a portfolio $S \subseteq P \times L$, that represents pattern-layer assignments. The task is to process C and produce an admissible, multi-criteria-evaluated, Pareto-filtered, and compromise-selected portfolio S* together with traceable intermediate data.

The problem is non-trivial for three reasons: (i) the candidate space |P×L|^n grows combinatorially; (ii) many combinations violate structural constraints; (iii) remaining admissible alternatives cannot be ranked by a single scalar score because NFRs form genuine trade-offs. Consequently, feasibility checking and multi-criteria comparison must be separated.

**Proposed information technology**. The IT is organised as a strictly ordered seven-stage workflow (Table 1): each stage consumes a machine-readable artifact from its predecessor and emits one for the next, serving simultaneously as a checkpoint for human review and as an input contract. The separation is deliberate — combinatorial pruning is confined to Stages 2–3 and ranking to Stages 4–6 — so that changes to criteria or preference weights re-execute only the cheap downstream stages. Although |P×L|^n grows combinatorially, the size bounds [$\ell$, u] in C and the Stage 3 feasibility filter together kept Stage 2 output below 25,000 portfolios on 16-pattern catalogs in the experiments below; substantially larger catalogs would replace exhaustive enumeration at Stage 2 with the MOILP solver of [7], which the stage contract already accommodates.

Table 1

**Information technology workflow stages**

| Stage | Name | Operations | Output artifact |
|---|---|---|---|
| 1 | Scenario formalization | Define domain, quality criteria, pattern catalog, constraints, preference weights | Validated scenario model C |
| 2 | Candidate generation | Enumerate portfolios S ⊆ P×L within size bounds [$\ell$, u] | Raw candidate set X(C) |
| 3 | Feasibility filtering | Reject portfolios violating budget, dependencies, incompatibilities, or coverage | Admissible set F(C) |
| 4 | Multi-criteria evaluation | Compute quality vector H(S, C) per portfolio using layer-responsibility weights | Scored portfolio matrix |
| 5 | Pareto filtering | Remove dominated portfolios; retain non-dominated set | Pareto set PS(C) |
| 6 | Compromise selection | Apply utility function U(S) or distance to ideal profile; rank Pareto set | Recommended portfolio S* |
| 7 | Artifact export | Write scenario hash, Pareto set, compromise portfolio, Pareto front plot data | pareto.csv, selected.csv, manifest.txt |

At Stage 1, the scenario model C is validated: criterion names, pattern identifiers, contribution profiles, and constraint consistency are checked. At Stage 2, candidate portfolios are enumerated within the size bounds [$\ell$, u] defined in C. Stage 3 applies hard admissibility rules: portfolios that exceed the budget, violate pattern dependencies or incompatibilities, or leave a critical criterion uncovered are removed, forming the admissible set F(C). Stage 4 computes a quality vector H(S, C) for each S ∈ F(C) using the layer-responsibility matrix W introduced in [8]; this eliminates inter-layer double-counting and keeps criterion scores bounded in [0, 1]. Stage 5 removes dominated portfolios using the non-dominated sorting procedure of [3]; $S_1$ dominates $S_2$ if $S_1$ is at least as good in every criterion and strictly better in at least one. The remaining portfolios form the Pareto set PS(C). Stage 6 applies a project-specific policy to PS(C): a weighted utility function U(S), defined in (1), ranks the alternatives and selects the compromise S*. Stage 7 exports all results as CSV and manifest files.

$$U(S) = \sum_{k \in K} v_k \cdot q_k^W(S). \quad (1)$$

**Software implementation**. The software complex that implements the proposed IT is written in Kotlin and organized into five functional modules. The Validation module parses the JSON scenario file and checks completeness, consistency of constraint graphs, and profile coverage. The Generation and Filtering module enumerates pattern-layer combinations and applies admissibility rules in a single pass. The Evaluation module computes H(S, C) using the W-weighted formula from [8]. The Pareto Filtering module implements standard non-dominated sorting. The Compromise Selection module applies the utility function and produces the recommended portfolio.

The modules are deliberately loosely coupled: each communicates exclusively through machine-readable file artifacts rather than in-memory state, so any single module can be replaced or re-run independently without affecting the rest of the pipeline. This design makes the workflow deterministic and reproducible.

**Experimental results.** The IT was validated on two scenarios. Experiment 1 (Exp1) targets infrastructure monitoring and control: a 16-pattern catalog, five criteria (security, reliability, low latency, scalability, complexity), and budget and dependency constraints. Generation produced 19,448 candidates; feasibility filtering retained 2,010; Pareto filtering identified 510 non-dominated portfolios. The compromise S* (U = 0.633) comprises API Gateway, OAuth2, TLS, Circuit Breaker, Health Checks, Message Broker, and Publish-Subscribe.

Experiment 2 (Exp2) targets bionic prosthesis software with an edge-dominant criterion set (patient safety, latency, reliability, energy efficiency, data security). From 23,816 candidates, 3,690 were feasible and 144 formed the Pareto set; the compromise (U = 0.649) includes Graceful Degradation, Health Checks, Local Caching, Sense-Compute-Control, TLS, Token Auth, and Watchdog Timer. The two U values are not directly comparable, since K and v differ between scenarios; each is a ranking signal only within its own Pareto set.

**Conclusions.** The proposed IT integrates seven stages into a single pipeline that operationalizes the MOILP model [7], the layer-responsibility matrix W [8], and the compromise utility function. Validation on two IoT domains showed that the IT identifies Pareto-optimal portfolios and selects justified compromise architectures (U = 0.633 and U = 0.649), producing machine-readable artifacts that make architectural decisions traceable and reproducible. Future work will pursue four directions: (i) automated adaptation of W to domain context, reducing reliance on expert-specified weights, (ii) sensitivity analysis of S* to perturbations of the preference vector *v*, (iii) empirical validation of the pattern catalog against deployed IoT systems, and (iv) extension to dynamic scenarios in which C evolves over the system lifecycle, requiring incremental re-synthesis.

## References


1. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. Fog computing and its role in the Internet of Things. Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing (MCC'12), Helsinki, Finland, 17 August 2012. P. 13–16. DOI: 10.1145/2342509.2342513.
2. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: vision and challenges. IEEE Internet of Things Journal. 2016. Vol. 3, No. 5. P. 637–646. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
3. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6, No. 2. P. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.
4. Liubchenko V., Chumachenko D. Quality Model for Software for Bionic Prostheses. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. 2023. Issue 4. P. 51–57. DOI: 10.32782/IT/2023-4-6.
5. Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. A systematic approach to selecting architectural patterns for IoT development. Applied Aspects of Information Technology. 2025. Vol. 8, No. 2. P. 178–190. DOI: 10.15276/aait.08.2025.12.
6. Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. A seven-step method for selecting architectural patterns for IoT. Information Technology and Implementation (Satellite): Conference Proceedings of the XII International Conference, November 21, 2025, Kyiv, Ukraine / V. Snytyuk (Ed.). Kyiv: Caravela, 2025. P. 245–248. ISBN 978-960-801-928-7.
7. Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. A multi-objective optimization model for designing the software architecture of Internet-of-Things systems. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2026. Issue 2 (363). P. 103–109. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-13.
8. Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. Responsibility-weighted aggregation of quality criteria in multi-layer IoT software architectures. Bulletin of the National Technical University KhPI. Series: System Analysis, Management and Information Technologies. 2026.

# MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE FOR OPTIMIZING THE DISTRIBUTION OF GENERATION AMONG GAS PISTON UNITS WITHIN A SINGLE-SITE ENVIRONMENT

**Ivanov D.**
Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine

**Abstract**. In the context of global energy transition and energy decentralization, small-scale distributed generation facilities, particularly Gas Piston Units (GPU), have become essential for ensuring the energy autonomy of industrial sites and small settlements. These units are cost-effective, compact, and could operate in co-generation cycles within local microgrids. Current energy market dynamics and national grid requirements increasingly push small businesses to deploy localized generation sites where optimization focuses on a single technological area. This paper develops a methodology for the static economic dispatch of generation among GPUs as a core component of automated control systems.

**Keywords**: Economic Dispatch, Distributed Generation, Gas Piston Units (GPU), Mixed-Integer Linear Programming (MILP), Static Mode Optimization.

**Introduction**. Global decarbonization and decentralization have increased the importance of small-scale distributed generation. Gas piston units are ideal examples, offering high maneuverability, low emissions, and cogeneration capabilities. Current energy trends are pushing small businesses to deploy these microgrids based on two concepts: autonomous "here and now" generation for a single site and rapid response to dynamic energy market requirements.

This research focuses on methods for calculating generation distribution within a small station at a single site that includes several identical GPUs. This approach abstracts from external network constraints and transmission losses between remote nodes, focusing instead on internal energy efficiency.

Power system optimization has evolved from the foundational Economic Dispatch (ED) frameworks of Wood, Wollenberg, and Sheblé (1) and the constraint management algorithms of Zhu (2) to modern studies. Recent research from 2024 and 2025, such as Wu et al. (3) and Kumar et al. (4), explores complex multi-vector systems and modern energy trading uncertainties. Today, Mixed-Integer Linear Programming (MILP) is the standard for solving these problems. As shown by Superchi et al. (5) and Villarroel et al. (6), MILP effectively models the discrete variables—such as unit startup/shutdown and step load changes—that are critical for GPU management. The issues of generation dispatch have also been extensively studied by domestic authors (7-8).

While the existing literature covers large-scale grid optimization and complex multi-source islands, there is a distinct need to investigate the Economic Dispatch problem specifically tailored for small-scale industrial sites. This practical constraint motivates the purpose of this work.

**Formulation of the problem.** The development of a mathematical model for optimizing the distribution of generated power among GPUs under conditions of separate generation sites, as well as to develop the software implementing this model and to test it in real-world conditions.

**Solving the problem.** The Economic Dispatch problem is formulated as a mathematical programming task, aimed at determining the generation levels for each of the $n$ GPUs by minimizing the objective function while adhering to a set of technical constraints.

**Definition of variables and parameters.**

For each gas piston unit $i \in \{1, \dots, n\}$ the following parameters are defined:

- $P_i^{min}$ – technical minimum gross power, MW;
- $P_i^{max}$ – maximum rated gross power, MW;
- $ON_i(P_i^{brutto})$ – auxiliary power consumption coefficient, depending on the current load, %;
- $C_i(P_i^{brutto})$ – specific fuel costs depending on the operating mode, typically UAH/MWh.

The decision variables are:

- $u_i \subset \{0, 1\}$ – a binary variable determining the unit status (1 – on, 0 – off);

– $P_i^{brutto}$ – the generated gross power of unit $i$, MW.

Since the unit's status $u_i$ and its gross power generation $P_i^{brutto}$ are known, we can determine the net generation by accounting for auxiliary power consumption $P_i^{netto}$. Furthermore, by incorporating raw material costs, we can calculate the total operating cost for the selected generation mode.

**Objective function.** The primary optimality criterion is the minimization of total operating fuel resource costs over the calculation time interval:

$$\min Z = \sum_i \left(C_i\left(P_i^{brutto}\right) + SC_i \cdot u_i\right), \quad (1)$$

where $SC_i$ – startup cost for corresponding GPU.

Typically, according to the GPU documentation, its operation is not constant. It is defined by several intervals or operating modes. For each interval, we know the points $(x_k, y_k)$, where $x_k$ – is the gross power and, $y_k$ – is a specific parameter of that interval. Therefore, all GPU characteristics are represented as piecewise linear functions.

**Generation Characteristics.** Since efficiency and auxiliary power consumption depend on the generation mode, the relationship between $P_i^{netto}$ and $P_i^{brutto}$ is described by a set of data points for each generation unit:

$$P_j^{netto} = f_j^{netto}(P_j^{brutto}), \quad (2)$$

where ***j*** ranges from 0 to the number of the unit's operating intervals.

**Cost Characteristics.** Fuel cost is assumed to be constant for a single optimization step (usually one hour). However, specific costs depend on the operating mode:

$$C_j = P_j^{brutto} \cdot b_j\left(P_j^{brutto}\right) \cdot Price_{fuel}, \quad (3)$$

where $b_j$ represents the specific costs in interval.

**Power Balance.** The total net output of all units must cover the target generation, which is typically the amount of power sold on the energy market:

$$\sum_i P_i^{netto} \geq P^{target\_netto}. \quad (4)$$

**Technical Generation Limits.** Each unit can only operate within its specific working range.:

$$u_i \cdot P_i^{brutto} \leq P_i^{netto} \leq P_i^{max}. \quad (5)$$

**Gross power constraints** are also defined:

$$0 \leq P_i^{brutto} \leq u_i \cdot P_i^{\max\_brutto}. \quad (6)$$

The set of dependencies (1) – (6) forms the optimization problem. Although this problem is non-linear, it is Mixed-Integer Linear Programming (MILP), which fully describes the operation of the GPU for various generation modes.

This type of problems can be solved in different ways. In this work, we used the well-known Gurobi optimization library. In the software implementation, the procedure forms a set of rules for Gurobi and calls its solver.

Currently, one generation site includes 4-8 identical GPUs, each having the following characteristics (Table 1).

Testing of proposed method on a station consisting of 8 GPUs demonstrates satisfactory results. The search for the optimal distribution on a 12-core system is performed in approximately one second. This is completely acceptable and allows very quick prompt response to commands from the energy market operator regarding changes in generation capacity.

Table 1

**Power dependable characteristics of GPU**

| Minimal generation, MW | | 1.05 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Maximal generation, MW | | 2.2 | | | | |
| Gross power, MW | Netto power, MW | Ramp up time, sec | Ramp down time, sec | Discreteness, MW | Own needs, MW | Specific cost, Cubic meter / MW |
| 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.15 | 1.05 | 217 | 16.5 | 0.0023 | 0.1 | 240.66252 |
| 1.725 | 1.625 | 128 | 16.5 | 0.0023 | 0.1 | 227.080745 |
| 2.3 | 2.2 | 128 | 0 | 0.0023 | 0.1 | 222.15320 |

**Conclusions.** The article presents a mathematical model for optimizing the distribution of generation among GPUs within a single-site environment. Although it is relatively simple, it allows address several practical problems in appropriate time.

The software developed based on the proposed method is part of the automated control system for the power generation station.

Further development of the model for GPU will include accounting for transient processes during generation ramp-up and ramp-down, as well as ensuring uniform GPU loading over specified periods.

An important direction for further development requested by the business is also the extension of the model to battery energy storage systems (BESS), which includes modeling both device charging and energy discharging.

## References


1. Wood, A. J., Wollenberg, B. F., Sheblé, G. B.: Power Generation, Operation, and Control. Wiley, (2013).
2. Zhu, J.: Optimization of Power System Operation. IEEE Press/Wiley, (2022).
3. Wu, Qingxia & Peng, Long & Han, Guoqing & Shu, Jin & Yuan, Meng & Wang, Bohong, 2025. "Deep-learning-based scheduling optimization of wind-hydrogen-energy storage system on energy islands," Energy, Elsevier, vol. 320(C).
4. Kumar, A., Singh, A., et al., 2025. "Multi-market participation of electricity–hydrogen DC microgrid with correlated uncertainties," Energy, Elsevier, vol. 333.
5. Superchi, F., Bianchini, A., Ferrari, L., 2025. "Towards sustainable energy independence: A case study of green hydrogen as seasonal storage integration in a small island," Renewable Energy, Elsevier, vol. 245.
6. Villarroel, N., Lazo, J., Watts, D., 2025. "High energy costs in insular energy systems and the potential for integrating innovative renewable solutions," Renewable Energy, Elsevier, vol. 246.
7. Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ye., Malohulko, Yu. V.: Optimization of the functioning of dispersed energy sources in local electrical systems. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. "Mechano-technological systems and complexes", No. 60 (1102), pp. 68–77, (2014).
8. Lezhniuk, P. D., Kulyk, V. V., Burykin, A. B., Teptia, V. V.: Optimal load distribution between power plants in energy market conditions. Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, No. 1, (2008).

# COMPARISON OF AUTOMATED TESTING FRAMEWORKS

**Krasnokutska I., Dutchak O.**
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

**Abstract.** This paper presents a comparative analysis of automated testing frameworks with a focus on differences in test writing approaches rather than tool-specific characteristics. The study examines Cypress, Selenium, and Playwright in terms of their programming paradigms, synchronization models, and abstraction levels. Special attention is given to how these frameworks influence test structure, readability, and maintainability. The results show that Cypress promotes a declarative and linear style with implicit synchronization, Selenium relies on an imperative model with explicit control, and Playwright combines both approaches through a hybrid design. These differences significantly impact the quality and stability of automated tests.

**Keywords:** automated testing, test design, Cypress, Selenium, Playwright, testing paradigms.

**Introduction.** Modern software development is characterized by rapid release cycles, increasing complexity of web applications, and high expectations regarding reliability and performance. In this context, automated testing has become an essential part of the development lifecycle. While numerous frameworks exist for automating tests, they are often compared by technical characteristics such as execution speed, browser support, or ease of setup. However, a more fundamental difference lies in how these frameworks shape the test-writing process. The way a testing tool handles asynchronous behavior, structures commands, and abstracts interactions directly influences the readability, maintainability, and reliability of test code. Therefore, analysing frameworks from the perspective of test writing approaches provides a deeper understanding of their practical application.

**The purpose of this work** is to examine and compare several modern automated testing frameworks, focusing on their functionality, usability, performance characteristics, and suitability for different types of software projects.

**Formulation of the problem.** Despite the wide variety of available testing frameworks, selecting the most appropriate tool remains a challenging task. Traditional comparisons tend to focus on functional capabilities, while differences in programming paradigms and test design approaches are often overlooked. As a result, development teams may adopt tools without fully understanding how they affect test structure and long-term maintenance. This creates the need for a comparative analysis focused specifically on how frameworks influence the process of writing automated tests.

**Main part.** The selected frameworks: Cypress, Selenium, and Playwright – represent fundamentally different approaches to writing automated tests, particularly in terms of execution model, synchronization handling, and level of abstraction. These differences are not limited to technical implementation but directly influence how developers structure test logic, organize code, and manage complexity [1,2].

Cypress follows a declarative and chain-based approach to writing tests. Commands are automatically queued and executed by the framework, while asynchronous behavior is abstracted away from the developer. As a result, test code appears synchronous and can be written in a linear and highly readable style without the need for explicit synchronization. Built-in waiting mechanisms ensure that commands are executed only when the corresponding elements are ready, which significantly reduces test instability. This approach simplifies test development and minimizes flakiness; however, it also limits flexibility in scenarios that require precise control over execution flow. Due to its structure, Cypress often encourages a more functional style of test design, where logic is kept within test files and reused through helper functions rather than extensive architectural patterns [3].

In contrast, Selenium is based on an imperative programming model, where tests are written as explicit sequences of commands. Developers are responsible for managing browser interactions and handling synchronization manually through various waiting strategies. This leads to more

verbose and complex code, as timing and state must be controlled explicitly. At the same time, such an approach provides maximum flexibility and allows fine-grained control over test execution. To address increased complexity, Selenium commonly relies on structured design patterns to improve maintainability and scalability. The most widely used is the Page Object Model (POM), which separates page structure from test logic. In addition, more advanced projects often apply patterns such as Page Factory, Layered Architecture (Test–Service–UI layers), and Data-Driven Testing, which help reduce duplication and improve test organization [4].

Playwright introduces a hybrid approach that combines elements of both declarative and imperative models. Similar to Cypress, it includes built-in automatic waiting mechanisms that reduce the need for manual synchronization. At the same time, it preserves an imperative structure, allowing developers to explicitly define test logic when necessary. This combination enables the creation of concise yet expressive tests that balance readability and control. Furthermore, features such as parallel execution, network interception, and built-in retries influence how tests are structured and executed, contributing to improved reliability and scalability. From a design perspective, Playwright supports both Page Object Model and more modern approaches such as Components Page Object Model(CPOM) and Screenplay Pattern, which focus on modeling user behavior rather than page structure. This makes it suitable for more modular and behavior-driven test architectures.

To better illustrate these differences, consider a simple login test scenario. In Cypress, the test is implemented as a sequence of chained commands, as presented in Listing 1.

Listing 1. Cypress login test implementation

```
cy.visit('/login');
cy.get('#username').type('user');
cy.get('#password').type('password');
cy.get('#loginBtn').click();
cy.contains('Welcome');
```

As shown in Listing 1, synchronization is handled automatically through built-in retry mechanisms and implicit waiting. This allows the test logic to remain linear and highly readable. Cypress promotes a command-based (fluent) style and generally encourages minimal abstraction, often relying on custom commands rather than full implementation of the Page Object Model.

Listing 2. Selenium login test implementation

```
driver.findElement(By.id("username")).sendKeys("user");
driver.findElement(By.id("password")).sendKeys("password");
driver.findElement(By.id("loginBtn")).click();
```

As demonstrated in Listing 2, synchronization must be managed explicitly using mechanisms such as implicit or explicit waits. This increases code verbosity and shifts responsibility for timing control to the developer. Consequently, structured design patterns such as the Page Object Model are commonly applied to improve the maintainability, readability, and organization of test code.

In Playwright, the test combines automatic synchronization with a flexible and structured approach, as illustrated in Listing 3.

Listing 3. Playwright login test implementation

```
await page.fill('#username', 'user');
await page.fill('#password', 'password');
await page.click('#loginBtn');
```

As shown in Listing 3, Playwright provides built-in auto-waiting mechanisms similar to Cypress while also supporting a more structured and scalable test architecture. This enables developers to maintain readability while applying advanced abstractions and design patterns, including the Page Object Model, when necessary.

Overall, the comparison demonstrates that the key distinction between these frameworks lies in how they shape the developer's approach to writing tests. Cypress reduces complexity through automation and a streamlined command-based API, Selenium emphasizes explicit control and structured design, while Playwright offers a balanced model that integrates both approaches. These differences directly influence the readability, maintainability, and reliability of automated test code.

**Conclusion.** This study provides a comprehensive comparison of modern automated testing frameworks, highlighting that their differences extend beyond technical features to the underlying approaches they impose on test development.

The findings confirm that the choice of a framework significantly influences not only the implementation process but also the long-term efficiency of test automation, including maintainability, scalability, and reliability. Each framework offers distinct advantages that may be more suitable depending on the project context, team expertise, and testing goals.

Therefore, selecting an appropriate testing tool should be considered a strategic decision, as it directly impacts both the development workflow and the overall quality of the software testing process.

## References


1. Moń, M.; Pańczyk, B.: A comparative analysis of web application test automation tools. Journal of Computer Sciences Institute, 35, pp. 159–165 (2025). https://doi.org/10.35784/jcsi.7119
2. Psujek, M.; Radzik, A.; Kozieł, G.: Comparative analysis of solutions used in automated testing of Internet applications. Journal of Computer Sciences Institute, 18, pp. 7–14 (2021). https://doi.org/10.35784/jcsi.2373
3. Tymoshchuk, A.: The evolution of test automation: From Selenium to Playwright. A comparison of automation tools: Selenium vs. Playwright vs. Cypress. International Journal of Computer,54(1),pp.37–45(2025). https://ijcjournal.org/InternationalJournalOfComputer/article/view/2355
4. Ponnan, A.: Comparative analysis of Selenium with other automated testing tools. International Journal of Novel Research and Development, 9(6), pp. a807–a809. https://ijnrd.org/papers/IJNRD2406081.pdf
5. Myers, G.; Sandler, C.; Badgett, T.: The Art of Software Testing. Wiley (2011).
6. Garousi, V.; Felderer, M.; Mäntylä, M.: The need for multivocal literature reviews in software engineering. Information and Software Technology (2019).

# PARAMETRIC AND STRUCTURAL SYNTHESIS OF MECHANICAL INFORMATION SYSTEMS OF VEHICLES

**Lytovchenko V.[1], Pidhornyy M.[2], Zasjadko A.[1]**
[1]State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (SSRI AME TC), Cherkasy, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University (ChSTU), Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This article develops a literature-based conceptual framework for the parametric and structural synthesis of mechanical information systems in vehicles. The proposed interpretation treats a mechanical variator, centrifugal governor, clutch, and related transmission components not only as power-transfer elements but also as physically embodied information-processing subsystems. In this sense, system state variables such as speed, torque, slip, inertia, and friction serve as carriers of non-symbolic information that is transformed into adaptive mechanical action. Recent research on electric-vehicle powertrains shows that continuously variable transmissions, multispeed transmissions, and multi-motor configurations are central design options for optimizing efficiency and driving performance [1]. Studies on CVT slip and clamping-force control demonstrate that proper closed-loop regulation can improve mechanical efficiency and energy economy [2]. Parallel work on adaptive drives confirms that mechanically realized transmission choices remain relevant where robustness and energy efficiency must coexist [3]. On the theoretical side, literature on physical intelligence and analog computing supports the view that material structures can partially off-load sensing, computation, and decision-making [4,5]. The article, therefore, formulates the closest analogues of the mechanical information system as the flyball governor, centrifugal clutch, adaptive CVT, and analog mechanical regulator. The result is a concise scientific description suitable for further methodological development and for inclusion in the theoretical section of a dissertation.

**Keywords**: Mechanical information system, Variator, Centrifugal governor, CVT, Structural synthesis, Parametric synthesis, Physical intelligence, Analog control.

**Introduction**. Traditional transmission theory treats a variator primarily as a mechanism for changing the transmission ratio. However, the adaptive behavior of modern mechanical transmissions suggests a broader interpretation: the mechanism does not merely transfer power, but also converts measurable state changes into a regulating action. This makes the system analytically closer to an information-processing device than to a passive kinematic chain.

Recent review literature on electric-vehicle powertrains confirms that continuously variable transmissions and multi-speed architectures are still actively studied as methods for optimizing power flow, energy efficiency, and driving performance [1]. At the same time, the slip behavior of CVTs has been shown to be a controllable variable that can be exploited to increase efficiency when the clamping force is regulated appropriately [2]. These findings justify treating a mechanically adaptive transmission as a system whose internal parameters encode operational knowledge.

**The purpose of the work** is to develop principles of structural and parametric synthesis for mechanical information systems in vehicle transmissions.

**Formulation of the problem**. determine how the structure and parameter set of a mechanical system can ensure stable and efficient adaptive behavior without external control units.

**Solving the problem**. A mechanical information system is a physically embodied structure in which energy transfer and information processing occur simultaneously through continuous variables such as speed, force, and displacement. The system state is distributed across masses, elastic elements, and contact interactions rather than represented symbolically. Its study is based on the relationship between measurable parameters and adaptive response. In this context, analog modeling is essential, as it represents a distinct mode of physical computation and system description [5]. The concept of physical intelligence further supports this view, defining the ability of materials and structures to perform sensing and response functions without external control layers [4].

Structural synthesis defines the minimal functional configuration required for adaptive behavior: sensing, comparison, transformation, and actuation. In mechanical systems, these

functions are typically integrated within a single kinematic chain. A classical example is the centrifugal governor, where rotational speed directly generates corrective motion, forming a feedback loop. Similar principles are realized in centrifugal clutches and adaptive variators. The key task of synthesis to ensure internal coupling of elements such that system stability is inherently maintained across operating conditions.

Parametric synthesis focuses on selecting and coordinating key physical parameters that determine system dynamics. For variators, these include rotational speed, torque, mass distribution, stiffness, geometry, friction, and slip. Their interaction defines the efficiency and stability of operation. Modern CVT studies highlight clamping force as a critical parameter governing slip: excessive force increases losses, while insufficient force causes instability. Adaptive control of this parameter improves efficiency and energy consumption [2]. Similar effects are observed in adaptive multi-speed and friction-based drives, where performance increases when parameters adjust dynamically rather than remain fixed [3]. Thus, parametric synthesis aims to define optimal operating domains instead of fixed values.

Key analogues include the centrifugal governor, centrifugal clutch, adaptive CVT, and analog regulators. These systems share real-time operation, direct transformation of physical state into control action, and absence of symbolic control layers. The flyball governor represents the fundamental feedback structure, while the adaptive CVT extends it to continuous ratio variation. Therefore, a variator can be interpreted as an analog controller integrated into the drivetrain. However, such systems should not be equated with digital controllers; control emerges directly from physical interactions rather than algorithmic processing.

For transport systems, the practical value of the proposed interpretation lies in design guidance. Once the mechanism is understood as an information-bearing structure, engineering attention shifts to stability margins, sensitivity, robustness, and adaptivity. This is particularly relevant for vehicles that experience a wide range of loads, road conditions, and driver inputs.

The literature indicates that optimized power-flow strategies in EV powertrains increasingly combine discrete gear stages, CVTs, and multi-motor architectures [1]. Within that spectrum, the mechanical information system occupies a niche where autonomy is obtained through geometry and dynamics rather than through electronics alone. Such a solution may be useful where simplicity, passive reliability, and low computational overhead are required.

Accordingly, the synthesis problem can be stated as follows: choose the structure and parameters of the mechanism so that its intrinsic dynamics implement a desired control law over the relevant operating envelope.

**Conclusion**. Mechanical information systems in vehicles can be defined as physically embodied adaptive structures that convert state information into regulating action through internal mechanics rather than external symbolic control. Their ontological basis is the unity of energy and information in one material process; their epistemological basis is analog, not purely digital, representation.

The nearest analogues are the centrifugal governor, centrifugal clutch, adaptive CVT, and other self-regulating mechanisms. Contemporary research on CVT slip control, adaptive drives, physical intelligence, and analog modeling supports this interpretation and shows that such systems remain scientifically relevant for modern vehicle technology.

## References


1. Mazali, I. I., et al. Review of the Methods to Optimize Power Flow in Electric Vehicle Powertrains for Efficiency and Driving Performance. Applied Sciences, 2022.
2. Fu, B., et al. Research on Clamping Force Control of CVT for Electric Vehicles Based on Slip Characteristics. Sensors, 2022.
3. Sultan, A., et al. Research and construction of an adaptive drive with increased efficiency based on a balancing friction clutch. 2024.
4. Ford, M. J., et al. Toward physical intelligence using flexible and soft materials. Journal of Materials Research, 2022.
5. Papayannopoulos, P., et al. Computing and modelling: Analog vs. Analogue. 2020.

# SPARSE VISUAL LANDMARKS FOR DRIFT CORRECTION IN GPS-DENIED UAV NAVIGATION

**Ostrovskyi Z., Barmak O.**
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

**Abstract.** GPS-denied UAV navigation requires correction cues that are reliable enough not merely to be identifiable, but also to be safe for inertial-state correction. This short paper presents a route-level workflow for using sparse visual landmarks to bound inertial drift. The object of the study is a geo-referenced urban route observed in satellite and UAV views; the purpose is to transform distinctive building instances into scheduled correction opportunities. The proposed method constructs a drift-compatible landmark bank from satellite imagery, represents candidate buildings by pooled intermediate features of a segmentation backbone, and verifies only the next expected landmark during flight. The comparison rule is learned from partial cross-view correspondences and calibrated under a false-reset budget. On the VPAIR benchmark, 55 selected landmarks cover 0.991 of the eligible urban frames with a median spacing of 32 frames. The final route test achieves 0.809 overall decision accuracy, 0.72 landmark-window recall, and 0.954 non-landmark accuracy. The results show that landmark-based correction is safer when recognition is scheduled, conservative, and able to abstain.

**Keywords:** GPS-denied navigation, UAV localisation, visual landmarks, inertial drift correction, cross-view matching, object embeddings.

**Introduction**. Unmanned aerial vehicles that operate without a trustworthy GNSS signal must keep a continuous trajectory estimate while avoiding unsafe visual corrections. Inertial navigation is always available, but its error grows with time. Visual localisation can reduce that error, but unrestricted image retrieval may return visually plausible yet geographically wrong matches in dense urban scenes. For a navigation system, such a false correction is more dangerous than a missed correction because it can move the state estimate to an incorrect coordinate.

Sparse visual landmarks offer a practical compromise between continuous visual odometry and global cross-view search. Instead of matching each camera frame against a large map, the UAV carries a small set of preselected reference objects and searches for them only at scheduled route points. The approach follows the authors' previous work on extracting distinctive urban buildings from Earth imagery [1], but changes the operational question from landmark discovery to drift-compatible use of landmarks. The resulting system should provide occasional trusted evidence rather than a visual reset at every frame.

This topic belongs to information technology in engineering and robotics, artificial intelligence, and modelling of complex processes. It is motivated by the recognised difficulty of GNSS-independent UAV navigation [2; 3] and by recent progress in visual geo-localisation with aerial and satellite imagery [4].

**Work Goal**. The goal of the work is to develop a route-level workflow that converts embedding-based building landmarks into scheduled visual correction opportunities for GPS-denied UAV navigation. The study addresses four tasks: to construct a landmark bank under a maximum admissible inertial-drift constraint; to arrange landmarks into an ordered route schedule; to define a conservative online confirmation rule that separates confirmed matches, rejected candidates, and missing evidence; and to evaluate the resulting workflow on a held-out route segment.

**Problem Statement**. Let the pre-mission map contain geo-referenced candidate objects detected in satellite imagery. Each object has an image mask, a ground-plane position, and a visual descriptor. The task is to select a sparse subset of objects that is visually distinctive enough for cross-view recognition and spatially distributed enough to prevent unbounded INS drift between visual updates. The selected landmarks are not used as a dense map. They form a bank from which the mission planner chooses an ordered schedule along the route.

During flight, the onboard module receives the next expected landmark, an appearance window derived from route geometry and the drift model, and the set of objects detected in the

current UAV frame. A correction event is allowed only when the best candidate satisfies a calibrated acceptance rule. Otherwise, the filter receives no visual update. Therefore, the main problem is not maximum recall; it is the safe trade-off between recovering enough scheduled landmarks and suppressing false resets on non-landmark frames.

**Main Part**. The proposed workflow (Fig. 1) separates offline territory preparation, mission-specific planning, and online confirmation. Offline processing extracts building candidates from satellite imagery and represents each object by pooling intermediate feature maps inside its segmentation support. Intermediate layers are retained because they preserve roof geometry and local appearance while avoiding a separate heavy retrieval network. The landmark bank is built iteratively: visually distinctive objects are preferred, but the selection also rewards additional spatial coverage and suppresses redundant neighbours. This produces a drift-compatible sparse bank rather than a list of buildings that are globally unusual.

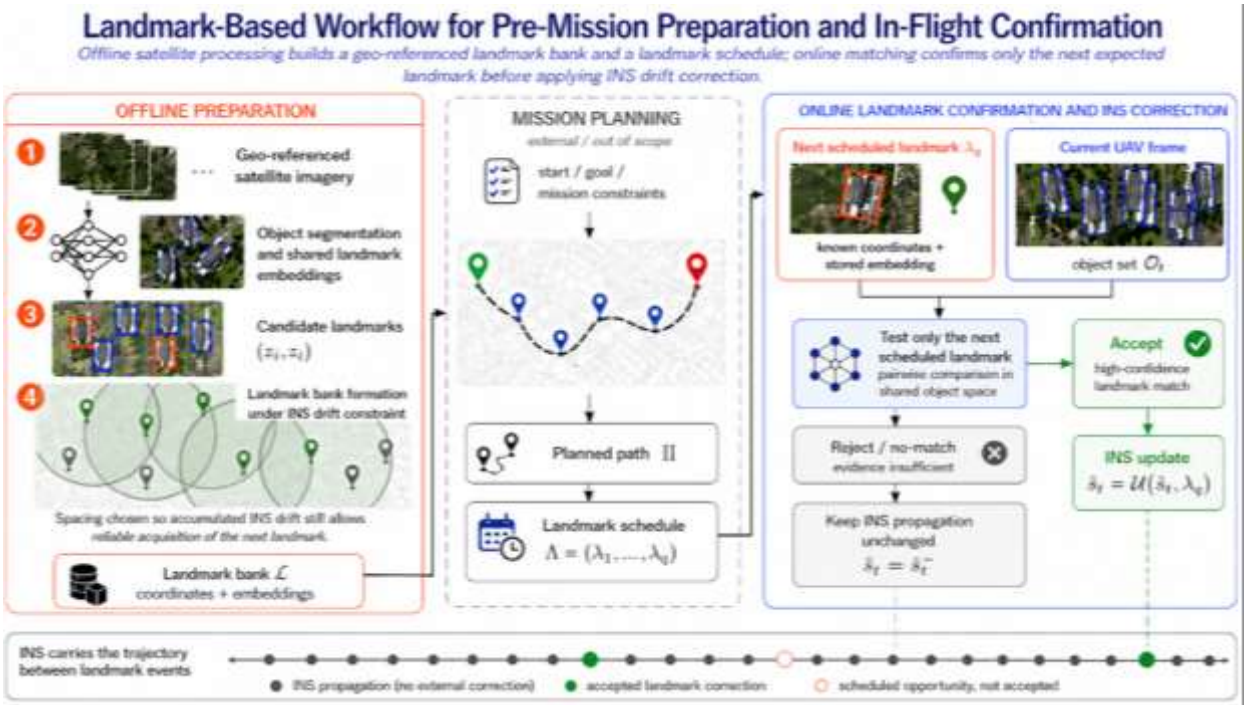



Fig. 1. Landmark-based workflow for pre-mission preparation and in-flight confirmation.

Mission planning is applied after the bank has been constructed. Given the start point, goal point, route restrictions, endurance limits, and safety margins, the planner chooses a feasible path and an ordered sequence of expected landmarks. Online matching is deliberately narrow. The UAV does not search freely over all references; it verifies only the next scheduled landmark against objects visible in the current frame. The matcher may confirm the landmark, reject visible candidates, or abstain when the expected evidence is absent. This abstention state is an essential navigation output, because it prevents forced associations when the scene is occluded, repetitive, or incompletely segmented.

The comparison rule is learned from partial building-level correspondences. The labels include exact matches, non-exact matches caused by segmentation disagreements, and no-match cases. This supervision is weaker than a fully curated identity dataset but more realistic for aerial cross-view navigation, where objects may be split, merged, or cropped differently across views. The final threshold is calibrated at the route level under a false-reset budget; therefore, the deployed operating point is conservative by design.

The experimental instantiation uses the VPAIR benchmark, a sequential aerial visual-place-recognition dataset with paired UAV and satellite imagery [5]. The retained one-to-one route contains 2,706 paired frames at 800 x 600 pixels, and the building-centred urban subset contains 1,234 frames. A YOLOv11n-seg building segmenter is applied to both modalities, producing 34,898 UAV-side building instances and 37,603 satellite-side instances. The practical matcher uses

a 640-dimensional feature subset from intermediate layers {6, 9, 10}, which keeps the model near 1 MB and enables more than two million pairwise scores per second in the evaluated CPU environment.

The results support three observations. First, the most distinctive buildings are not automatically the best navigation landmarks; placement must be constrained by the drift budget. Second, scheduled verification is safer than unrestricted retrieval because the online system answers a narrower question: whether the expected reference is visible now. Third, no-match handling is not a failure mode but a protection mechanism. In the held-out route test, landmark-window recall of 0.72 is accompanied by non-landmark accuracy of 0.954, which is preferable to a more aggressive policy that would create many visually plausible but unsafe corrections.

Two implementation consequences follow from this design. The landmark bank can be prepared before the mission and stored as a compact set of object descriptors and geographic coordinates, while the onboard computation is limited to segmentation, descriptor extraction, and verification of one expected reference. The INS update may therefore be implemented as a pseudo-measurement or as a direct correction, depending on the flight controller, without changing the visual confirmation logic. The visual module does not decide the global pose alone; it supplies a timestamped, geo-referenced correction cue whose reliability has been calibrated before deployment.

The main remaining failure modes are caused by incomplete or inconsistent object segmentation, viewpoint-dependent roof appearance, and repetitive urban structures. Some scheduled landmarks are missed when the same physical building is split into different instances in satellite and UAV views. These errors motivate future integration of temporal confirmation, geometric consistency checks, and route-level uncertainty estimates.

**Conclusions**. A short-paper version of the proposed approach has been presented for sparse visual landmarks in GPS-denied UAV navigation. The method constructs a drift-compatible bank of geo-referenced building landmarks from satellite imagery, schedules selected landmarks along the route, and confirms only the next expected landmark before permitting an INS correction. On VPAIR, the deployed policy achieves 0.809 overall decision accuracy, 0.72 landmark-window recall, and 0.954 non-landmark accuracy on a held-out route segment. These results indicate that cross-view object recognition is better suited to UAV navigation when embedded in a scheduled, drift-aware, and abstention-capable workflow. Future work should integrate the confirmed events into a complete inertial filter, improve cross-view instance consistency, and evaluate the method on additional routes and object classes.

## References


1. Ostrovskyi Z., Barmak O., Radiuk P., Krak I. Unsupervised knowledge extraction of distinctive landmarks from Earth imagery using deep feature outliers for robust UAV geo-localization. Machine Learning and Knowledge Extraction. 2025. Vol. 7. Article 81. doi:10.3390/make7030081.
2. Gyagenda N., Hatilima J. V., Roth H., Zhmud V. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques. Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 152. Article 104069. doi:10.1016/j.robot.2022.104069.
3. Chang Y., Cheng Y., Manzoor U., Murray J. C. A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments. Robotics and Autonomous Systems. 2023. Vol. 170. Article 104533. doi:10.1016/j.robot.2023.104533.
4. Ye Q., Luo J., Lin Y. A coarse-to-fine visual geo-localization method for GNSS-denied UAV with oblique-view imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2024. Vol. 212. P. 306-322. doi:10.1016/j.isprsjprs.2024.05.006.
5. Schleiss M., Rouatbi F., Cremers D. VPAIR: Aerial visual place recognition and localization in large-scale outdoor environments. arXiv:2205.11567. 2022. doi:10.48550/arXiv.2205.11567.
6. S. Lowry, N. Sunderhauf, P. Newman, et al., Visual place recognition: A survey, IEEE Transactions on Robotics 32 (2016) 1-19. doi:10.1109/TRO.2015.2496823.
7. X. Qu, B. Soheilian, N. Paparoditis, Landmark based localization in urban environment, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 140 (2018) 90-103. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.09.010.
8. J. Lin, Z. Zheng, Z. Zhong, Z. Luo, S. Li, Y. Yang, N. Sebe, Joint representation learning and keypoint detection for cross-view geo-localization, IEEE Transactions on Image Processing 31 (2022) 3780-3792. doi:10.1109/TIP.2022.3175601.

# INTEGRATION OF SMART MIRRORS FOR VIRTUAL FITTING WITH OMNICHANNEL SALES SYSTEMS

**Riabchykov M., Nazarchuk L., Tkachuk O., Surova N.**
Lutsk National Technical University, Ukraine

**Abstract**. This study explores the integration of smart mirror technologies for virtual clothing fitting with omnichannel retail systems. The proposed approach combines augmented reality, computer vision, and 3D modeling to enhance customer experience by merging online and offline sales channels. A modular architecture of the smart mirror system is developed, including data capture, body modeling, virtual fitting, and recommendation modules, as well as integration with CRM, ERP, and e-commerce platforms. An experimental study involving 82 participants evaluates key performance indicators such as fitting accuracy, processing speed, and visualization quality. Special attention is given to lighting conditions, and an integral lighting quality indicator is proposed, identifying an optimal illumination level of approximately 380 lux. A BPMN model of the purchasing process through a smart mirror is also developed. The results confirm the effectiveness of smart mirrors in improving personalization, decision-making efficiency, and retail performance.

**Keywords**: smart mirror, virtual fitting, omnichannel retail, computer vision, augmented reality, BPMN

**Introduction**. Digital technologies such as augmented reality, computer vision, and 3D modeling are transforming the clothing retail sector. Smart mirrors enable virtual fitting by overlaying digital garments onto users in real time, enhancing the shopping experience. At the same time, omnichannel retail integrates physical stores, online platforms, and mobile applications into a unified system. However, comprehensive integration of smart mirrors with such systems remains insufficiently explored [1].

**The purpose of the work**. The purpose of this study is to develop approaches for integrating smart mirrors for virtual fitting with omnichannel sales systems and to determine the conditions for their effective operation.

**Formulation of the problem**. Despite advances in virtual fitting and omnichannel retail, their combined implementation remains limited. There is a need to define system architecture, integration mechanisms, and business process models for smart mirror applications.

**Solving the problem**.

A modular architecture of the smart mirror system is proposed, including data capture, computer vision, 3D body modeling, virtual fitting, and AI-based recommendation modules. The system allows users to interact through gestures or touch interfaces. BPMN methodology is used to model the purchasing process in an omnichannel environment [2].



Fig. 1. Smart mirror usage in experimental environment

The experiment was carried out on the basis of a smart mirror at the Lutsk National Technical University (Fig. 1). An experimental study with 82 participants evaluated system performance. Key factors include fitting accuracy, recognition quality, and visualization. Lighting conditions significantly affect system performance. An integral lighting quality indicator was developed, showing optimal illumination at approximately 380 lux (fig.2).

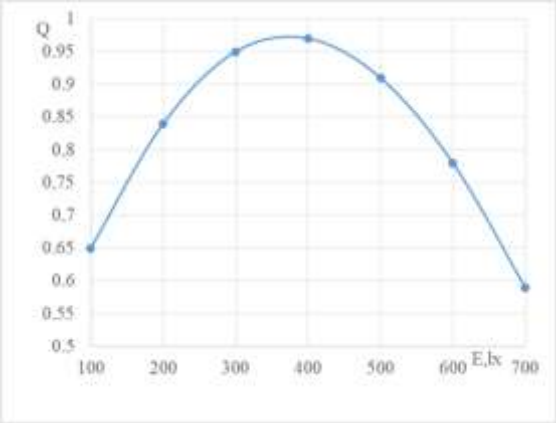



Fig. 2. Recognition quality depending on illumination

The smart mirror system for virtual clothing fitting integrated with an omnichannel sales environment is structured as a multi-layer architecture, including user interface, AR processing, integration, business systems, data, and analytics layers. The user interface enables interaction through a smart mirror equipped with a display, depth camera, and gesture or touch controls, allowing product selection, visualization, and cart management. Augmented Reality and Computer Vision technologies provide real-time body recognition and virtual garment overlay.

The AR processing layer performs body tracking, 3D modeling, and garment simulation, supported by a database of clothing models.

A BPMN model describes the purchasing process, from user identification and virtual fitting to product selection, availability checking, and order completion. The model integrates all participants and supports multiple payment and delivery options, ensuring seamless omnichannel interaction.

The integration of smart mirrors into omnichannel systems enhances personalization, reduces decision-making time, and improves customer experience. The proposed architecture ensures scalability and effective data exchange between systems. However, further research is needed in data security and algorithm optimization.

**Conclusion.** A comprehensive approach to integrating smart mirrors with omnichannel systems is proposed. The study confirms the importance of environmental factors and demonstrates the effectiveness of smart mirrors in modern retail. Future work should focus on improving computer vision algorithms and data protection.

## References


1. Prajapati, K.B., Bhatt, C., Chaouchi, H. (2022) *An Interactive Smart Mirror Using Internet of Things and Machine Learning.* In: Nayak, P., Pal, S., Peng, SL. (eds) IoT and Analytics for Sensor Networks. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 244. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2919-8_1.
2. Febryanto, K.C., Androfaza, I.A., Wadagraprana, L.A., Sarno, R., Sungkono, K.R., Anistyasari, Y., Siswantoro, J., Tjoa, A.M. (2026) *BPMN graph transformation: A unified multi-format parser library for standardized graph-based business process model integration*. SoftwareX, Volume 33, 102548. https://doi.org/10.1016/j.softx.2026.102548.
3. Yu, J., Xie, J., Lu, H. (2025) *Virtual fitting room technology: unleashing the transformative potential for fashion brands' retail operational performance*. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, Vol. 37 No. 8, 2558–2577. https://doi.org/10.1108/APJML-06-2024-0844.

# INFLUENCE OF CAMERA SENSOR SIZE AND RESOLUTION ON PHOTOGRAMMETRIC 3D RECONSTRUCTION QUALITY: A COMPARATIVE STUDY OF APS-C AND MEDIUM-FORMAT SENSORS

**Vdovychenko V.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This work presents a comparative experimental study of how camera sensor physical size and image resolution influence the quality of 3D models reconstructed by photogrammetric methods. Two cameras with broadly comparable fields of view were used: a Fujifilm X-T5 (APS-C sensor, 40 MP) and a Fujifilm GFX 100S II (medium-format sensor, 102 MP). Approximately 55 photographs of the same physical object were captured with each camera under matched scene and shooting conditions, and 3D models were reconstructed in Apple Object Capture at the highest available quality preset. The resulting USDZ models were compared using a custom Python evaluation pipeline computing geometric, topological, and structural metrics. Within the limitations of this single-object study, the results indicate that the higher-resolution medium-format dataset produces a denser and structurally more detailed reconstruction, accompanied by an approximately 3.4-fold increase in file size and a non-negligible discrepancy in absolute metric scale between the two reconstructions.

**Keywords:** Photogrammetry, 3D Reconstruction, Apple Object Capture, Sensor Size, Sensor Resolution, Medium Format, Mesh Quality, Comparative Study.

**Introduction and Problem Statement**. Photogrammetric 3D reconstruction extracts geometric and textural information from a set of overlapping photographs by detecting and matching image features across views, estimating camera poses, and triangulating dense point clouds and surface meshes [1, 2]. Because the entire pipeline operates on input images, the optical and sensor characteristics of the capturing device set an upper bound on the achievable reconstruction fidelity.

Recent automated tools such as Apple Object Capture [3] have made photogrammetric reconstruction broadly accessible, often producing geometrically valid, watertight, textured meshes from a moderate number of photographs without requiring expert intervention [4]. The same tool, however, may yield noticeably different outputs depending on the imaging device used. While there is a general understanding that higher-quality cameras tend to produce higher-quality models, the specific contribution of sensor physical size versus image resolution to the geometry, topology, and texture content of the resulting 3D model is rarely quantified for consumer-grade automated pipelines. The present study addresses this gap with a controlled comparison between two cameras of similar field of view but different sensor format and pixel count.

**Theoretical Background.** Several optical and sensor-related factors are known to influence photogrammetric reconstruction quality.

*Image resolution* determines the spatial frequency at which texture and surface detail are sampled. Feature detection and dense matching algorithms benefit from finer spatial detail, leading to denser keypoint sets and more accurate triangulation, particularly on weakly textured surfaces [5, 6].

*Pixel pitch and sensor size* govern light-gathering capability per pixel, dynamic range, and signal-to-noise ratio. Larger sensors of comparable resolution generally produce cleaner images, especially under high-contrast illumination. Lower image noise improves both feature repeatability across overlapping frames and the perceived quality of texture maps baked into the final model [7].

*Lens and focal-length equivalence* matter because field of view, perspective, and depth of field jointly affect coverage, parallax, and feature distribution. For a fair sensor-size comparison, the full-frame-equivalent focal length must be matched as closely as possible; otherwise, differences in framing, rather than sensor characteristics, dominate the result [8].

*Pipeline trade-offs* are unavoidable: more visual detail produces denser meshes, larger texture atlases, and longer processing times, and increases the final size of the reconstructed 3D asset. For applications such as augmented reality, web delivery, or mobile rendering, this trade-off must be balanced against the practical constraints of the target platform.

**Materials and Methods.** *Capture devices.* Fujifilm X-T5: APS-C sensor, 40 MP, 27 mm lens (≈41 mm full-frame equivalent). Fujifilm GFX 100S II: medium-format sensor, 102 MP, 55 mm lens (≈44 mm full-frame equivalent). The cameras were chosen so that the principal independent variables were sensor format and resolution, while the field of view remained closely matched.

*Acquisition protocol.* For each camera, between 53 and 55 photographs of a single physical object were captured under the same scene illumination and the same general shooting geometry. Camera settings were kept identical or as comparable as the two systems permitted.

*Reconstruction*. Both image sets were processed in Apple Object Capture at the highest available quality preset. The output of each reconstruction is a single watertight, textured mesh exported in USDZ format with five accompanying texture maps (basecolor, roughness, normal, ambient occlusion, and a 32-bit displacement map).

**Quantitative evaluation.** A custom Python tool was developed for the synthetic comparison of the two USDZ outputs. The tool extracts geometry from the embedded USD scene, applies local-to-world transforms, and computes (i) *geometric metrics*: bidirectional Chamfer L2 distance, symmetric Hausdorff distance, root-mean-square surface deviation [9], F-score at multiple distance thresholds with the corresponding precision and recall values, and a surface-voxel volumetric Intersection over Union [10]; (ii) *topological metrics*: vertex, edge, and face counts, watertightness, winding consistency, the number of non-manifold and boundary edges, the Euler characteristic, the genus, surface area, volume, the face-area distribution, and the mean triangle aspect ratio; (iii) *structural metrics*: archive size, the number of USD primitives, materials, and embedded textures. Comparisons were performed both directly and after a rigid alignment of the candidate to the reference model using point-to-point Iterative Closest Point. The F-score thresholds $\tau$ were specified as fractions of the reference bounding-box diagonal, providing a dimensionless quality criterion.

**Results and Discussion.** Representative input photographs together with the corresponding reconstructed 3D models for both capture devices are shown in Fig. 1 (Fujifilm GFX 100S II) and Fig. 2 (Fujifilm X-T5).



Fig. 1. One of the photos and the generated 3D model. Fujifilm GFX 100S II



Fig. 2. One of the photos and the generated 3D model. Fujifilm X-T5

Table 1

**Topological and structural properties of the reconstructed 3D models**

| Property | Fujifilm X-T5 (40 MP, APS-C) | Fujifilm GFX 100S II (102 MP, MF) |
|---|---|---|
| Vertices | 49 998 | 61 047 |
| Faces | 100 000 | 122 102 |
| Watertight / manifold | yes / yes | yes / yes |
| Non-manifold edges | 0 | 0 |
| Connected components | 1 | 1 |
| Genus | 2 | 3 |
| Surface area, $m^2$ | 0.151 | 0.201 |
| Volume, $m^3$ | $2.29 \times 10^{-3}$ | $3.36 \times 10^{-3}$ |
| Bounding-box diagonal, m | 0.386 | 0.441 |
| Mean triangle aspect ratio | 1.55 | 1.58 |
| Embedded textures (PBR maps) | 5 | 5 |
| Archive size, MB | 62.8 | 215.2 |

As summarized in Table 1, both reconstructions are topologically valid: each output is a single watertight, manifold mesh with consistent winding and no degenerate boundaries, which is typical of Object-Capture-grade outputs. Within this baseline of structural validity, the higher-resolution dataset produces a noticeably denser model. The GFX-based mesh contains approximately 22% more vertices and faces and exposes 33% more surface area than its APS-C counterpart. The corresponding archive grows from 62.8 MB to 215.2 MB (a 3.4-fold increase), reflecting both the denser geometry and the higher resolution of the baked PBR texture atlases.

Table 2

**Geometric divergence between the two reconstructions, before and after rigid alignment**

| Metric | Without alignment | With ICP alignment |
|---|---|---|
| Chamfer L2 (mean), mm | 9.84 | 7.59 |
| Hausdorff distance (symmetric), mm | 36.49 | 22.25 |
| RMS surface deviation, mm | 13.13 | 8.73 |
| F-score @ $\tau$ = 0.5% bbox-diag | 0.155 | 0.108 |
| F-score @ $\tau$ = 1.0% bbox-diag | 0.308 | 0.231 |
| F-score @ $\tau$ = 2.0% bbox-diag | 0.537 | 0.521 |
| Surface-voxel IoU | 0.081 | 0.055 |

Distances are reported in the metric units of the reconstructed scene; $\tau$ is expressed as a fraction of the reference bounding-box diagonal (0.386 m).

Table 2 reports the geometric divergence between the two reconstructions before and after rigid alignment. Rigid ICP alignment reduces the mean and worst-case distances by approximately 23–39% (Table 2), but does not improve F-score or volumetric IoU. This pattern is consistent with a residual difference in metric scale between the two reconstructions that a rigid transformation cannot compensate. The bounding-box diagonals differ by approximately 14% (0.386 m vs 0.441 m) and the reconstructed volumes by 47%, suggesting that the absolute scale recovered by ARKit-based Object Capture is sensor- or session-dependent. This observation has practical implications for any photogrammetric workflow that requires metrically calibrated outputs across different capture devices.

The two models also differ in topological genus (2 vs 3). Because both meshes are watertight and originate from the same physical object, this difference reflects an algorithmic interpretation discrepancy rather than a real geometric change: the higher-resolution medium-format dataset preserved a small through-going opening that was bridged in the APS-C reconstruction. This illustrates that sensor resolution can influence the topology of the reconstructed surface, not only its smoothness.

It should be emphasized that the present study uses the same physical object captured with both cameras, but does not include an independent metric ground truth, such as a structured-light or laser scan. Therefore, the geometric metrics reported above characterize the divergence between the two reconstructions rather than the absolute accuracy of either.

**Conclusion**. Within the limitations of this experiment — a single physical object, two camera systems, one reconstruction tool, and no external metric ground truth — the results indicate the following. The higher-resolution medium-format reconstruction (Fujifilm GFX 100S II, 102 MP) produced a 3D model with measurably greater geometric density (approximately 22% more polygons), larger reconstructed surface area (approximately 33%), and richer texture content than the APS-C reconstruction (Fujifilm X-T5, 40 MP), at the cost of an approximately 3.4-fold increase in file size.

Both reconstructions remained topologically valid and watertight, suggesting that the Object Capture pipeline is robust to sensor differences in this regard. However, fine topological detail (such as a small through-going opening) was preserved only on the higher-resolution dataset. The two reconstructions also exhibited a non-negligible discrepancy in absolute metric scale (≈14% in bounding-box diagonal), which limits the usefulness of direct geometric comparison without prior scale normalization.

Further research should extend this comparison to multiple physical objects, varied lighting conditions, different surface materials and textures, additional reconstruction tools (for example RealityCapture, Agisoft Metashape, or Meshroom), and an external metric ground truth. Subsequent studies should also incorporate quantitative texture-quality metrics, reconstruction time, point-cloud density, and reprojection error where the reconstruction software exposes them.

## References


1. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 670 p.
2. Schönberger J. L., Frahm J.-M. Structure-from-Motion Revisited // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 4104–4113.
3. Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M. "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. 2012. Vol. 179. P. 300–314.
4. Remondino F., El-Hakim S. Image-based 3D modelling: A review // The Photogrammetric Record. 2006. Vol. 21, No. 115. P. 269–291.
5. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60, No. 2. P. 91–110.
6. Furukawa Y., Hernández C. Multi-View Stereo: A Tutorial // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. 2015. Vol. 9, No. 1–2. P. 1–148.
7. Mosbrucker A. R., Major J. J., Spicer K. R., Pitlick J. Camera system considerations for geomorphic applications of SfM photogrammetry // Earth Surface Processes and Landforms. 2017. Vol. 42, No. 6. P. 969–986.
8. O'Connor J., Smith M. J., James M. R. Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data // Progress in Physical Geography. 2017. Vol. 41, No. 3. P. 325–344.
9. Cignoni P., Rocchini C., Scopigno R. Metro: Measuring error on simplified surfaces // Computer Graphics Forum. 1998. Vol. 17, No. 2. P. 167–174.
10. Knapitsch A., Park J., Zhou Q.-Y., Koltun V. Tanks and Temples: Benchmarking Large-Scale Scene Reconstruction // ACM Transactions on Graphics. 2017. Vol. 36, No. 4. Art. 78.

# ПРОГРАМНА СИНХРОНІЗАЦІЯ RTC-МОДУЛІВ DS3231/DS1307 У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

**Войтех М.Ю., Кравченко О.П.**
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

**Анотація**. У роботі розглянуто задачу програмної синхронізації модулів реального часу DS3231/DS1307 з персональним комп'ютером у розподілених системах моніторингу. Метою дослідження є розроблення програмних засобів узгодження часу RTC-модулів із зовнішнім еталонним джерелом часу. Завдання включають проєктування двостороннього протоколу обміну між ПК та мікроконтролером через UART, реалізацію настільної утиліти, розроблення вбудованого програмного забезпечення для запису скоригованого часу в RTC по шині $I^2C$ та оцінювання точності синхронізації. Об'єктом дослідження є процес часової синхронізації вузлів розподіленої моніторингової системи; предметом дослідження є програмний протокол і засоби синхронізації RTC-модулів. Використано методи програмного моделювання обміну, оцінювання затримки кадрів і експериментальної перевірки стабільності. Результатом є підхід до компенсації затримок UART і запису скоригованого часу, що підвищує узгодженість часових міток у сенсорних вузлах. Цей підхід є інваріантним до апаратної точності модулів, що дозволяє ефективно використовувати як бюджетні чіпи DS1307, так і високоточні термокомпенсовані DS3231.

**Ключові слова**: модуль реального часу, RTC, DS3231, DS1307, програмна синхронізація, UART, $I^2C$.

# SOFTWARE SYNCHRONIZATION OF DS3231/DS1307 RTC MODULES IN DISTRIBUTED SYSTEMS

**Voitekh M.Yu., Kravchenko O.P.**
State University "Kyiv Aviation Institute"

**Abstract**. The paper considers the problem of software synchronization of DS3231/DS1307 real-time clock modules with a personal computer in distributed monitoring systems. The aim of the study is to develop software tools for aligning the RTC module time with an external reference time source. The tasks include designing a two-way exchange protocol between a PC and a microcontroller via UART, implementing a desktop utility, developing embedded microcontroller software for writing corrected time to RTC registers via the $I^2C$ bus, and evaluating synchronization accuracy. The object of the study is the process of time synchronization of nodes in a distributed monitoring system; the subject is the software protocol and tools for synchronizing DS3231/DS1307 RTC modules. The methods include software modelling of data exchange, frame delay estimation, and experimental verification of stability. The result is an approach for compensating UART delays and writing corrected time, which improves the consistency of timestamps in sensor nodes. This approach is invariant to the hardware accuracy of the modules, enabling the efficient use of both budget-friendly DS1307 chips and high-precision temperature-compensated DS3231 units.

**Keywords**: real-time clock module, RTC, DS3231, DS1307, software synchronization, UART, $I^2C$.

**Вступ**. У розподілених системах моніторингу стану навколишнього середовища, де дані агрегуються з різних сенсорних вузлів, кореність часових міток вимірювань є критично важливою для достовірного аналізу[1][2]. На практиці в таких системах широко застосовуються недорогі модулі реального часу (RTC) на базі чипів DS3231 або DS1307. Проте, незважаючи на наявність спільного інтерфейсу $I^2C$, ці чипи мають різну апаратну базу, а саме, DS3231 є термокомпенсованим, що забезпечує високу стабільність його роботи, тоді як DS1307 є схильним до значного дрейфу у часі. Спільною для обох типів чипів є проблема затримок при спробі синхронізації з еталонним джерелом (ПК) через послідовний інтерфейс UART [3][4]. Без періодичної корекції це призводить до значних розбіжностей у часових шкалах вузлів, що унеможливлює коректну мультиагентну аналітику. Тому, актуальною є задача розроблення простого та відтворюваного програмного рішення для узгодження часу на таких RTC-модулях, незалежного від стабільності конкретного чіпа, із

зовнішнім еталонним джерелом, яким у типових мережевих системах виступає персональний комп'ютер (ПК), синхронізований за протоколом NTP.

**Мета роботи**. Метою роботи є розроблення програмних засобів синхронізації RTC-модулів DS3231/DS1307 з ПК в архітектурі розподілених систем моніторингу. Для досягнення мети було поставлено наступні завдання: 1) Проєктування двостороннього протоколу обміну між ПК та мікроконтролером (МК) через послідовний інтерфейс UART, що включає механізм оцінки затримки проходження кадрів. 2) Реалізація настільної утиліти на ПК для ініціації, керування та контролю процесу синхронізації. 3) Розробка вбудованого програмного забезпечення МК для приймання команд, обробки кадрів, обчислення скоригованого часу та його запису в регістри RTC по шині I2C. 4) Експериментальна оцінка досяжної точності та стабільності синхронізації в типових умовах експлуатації..

**Постановка задачі**. Задача полягає у проєктуванні та реалізації відтворюваного механізму синхронізації RTC-модулів DS3231/DS1307 з ПК через UART з оцінкою затримки проходження кадрів і записом скоригованого часу в регістри RTC.

**Основна частина**. Структурно система складається з трьох основних компонентів: персонального комп'ютера, мікроконтролера та модуля реального часу DS3231/DS1307. ПК (Master) отримує точний час з мережі (наприклад, за допомогою NTP) і взаємодіє з мікроконтролером через послідовний інтерфейс UART. Мікроконтролер (Slave), у свою чергу, з'єднаний із RTC-модулем по шині $I^2C$ і відповідає за запис/зчитування регістрів часу на модулі. На ПК працює окрема утиліта, яка запускає процедуру синхронізації та обробляє відповіді мікроконтролера, а в мікроконтролері реалізовано стан-машину для обробки команд, перевірки коректності кадрів і оновлення часу в RTC.

Запропонований протокол синхронізації використовує двосторонній обмін службовими кадрами для компенсації затримки. ПК надсилає МК кадр із поточним системним часом T_send та кодом команди. МК приймає кадр і негайно формує зворотний кадр, додаючи до нього локальну часову мітку моменту отримання T_receive_local. ПК отримує зворотний кадр і фіксує час отримання T_ack. На основі пари T_send – T_ack оцінюється затримка проходження $\Delta t$ за каналом UART. Значення часу перед записом у RTC скориговується на обчислену затримку. Цей підхід забезпечує високу точність, оскільки компенсує варіації, спричинені операційною системою ПК та затримками в каналі UART.

**Висновок**. Запропоновано програмний метод узгодження часу для RTC-модулів, що базується на обчисленні реальної затримки передачі кадрів через UART, що дозволяє досягти когерентності часових міток у розподілених вузлах незалежно від апаратної стабільності конкретного чіпа (DS3231 або DS1307).

## Список використаних джерел


1. Зайцев В. Г., Цибаєв Є. І. Комп'ютерні системи реального часу : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 162 с. – Режим доступу: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/123_2302.pdf
2. Kopetz H. Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2002. – eBook ISBN 0-306-47055-1. – Режим доступу: https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2015/03/LES-SYSTEMES-TEMPS-REELS-Conception-des-applications-embarqu%C3%A9s-distribu%C3%A9s.pdf
3. Maxim Integrated. DS3231: Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal : Datasheet. – Analog Devices, Inc. – Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf
4. Maxim Integrated. DS1307: 64 × 8 Serial I²C Real-Time Clock : Datasheet. – Analog Devices, Inc. – Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS1307.pdf

# ПРОЄКТУВАННЯ КЛІЄНТ-СЕРВЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ГРУПОВИХ ПОДОРОЖЕЙ

**Заліський М.[1], Отрох С.[2], Тараненко А.[2], Кондратенко С.[2]**
[1]Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

**Анотація.** У статті описано концепцію цілісної цифрової системи для організації групових подорожей. Актуальність роботи зумовлена тим, що під час підготовки однієї поїздки організатори та учасники часто використовують одразу кілька різних засобів: месенджери, таблиці, карти й платіжні сервіси. Об’єктом дослідження є процес організації групових подорожей в умовах використання розрізнених цифрових інструментів. Предметом дослідження є архітектура та функціональні модулі клієнт-серверної системи для спільного планування поїздок. Завдання роботи – проаналізувати наявні проблеми координації учасників групових подорожей; визначити вимоги до єдиної платформи; розробити концепцію системи з інтерактивною картою, чатом, сповіщеннями та фінансовим модулем. Використано методи системного аналізу, об'єктно-орієнтованого проєктування та моделювання архітектури програмного забезпечення. Результатом є концепція платформи, що об'єднує планування маршруту, комунікацію та поетапні платежі з голосуванням учасників в одному продукті.

**Ключові слова:** Платформа планування групових подорожей, інтерактивна карта, онлайн-чат, сповіщення, голосування учасників, поетапні платежі, депозит організатора, архітектура «клієнт-сервер».

# DESIGNING A CLIENT-SERVER SYSTEM FOR GROUP TRIP PLANNING

**Zaliskyi M.[1], Otrokh S.[2], Taranenko A.[2], Kondratenko S.[2]**
[1]State University “Kyiv Aviation Institute”, Kyiv, Ukraine
[2]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This article describes the idea of a client-server system for planning group trips. This topic is important because people often use many different services when they organize one trip, for example, chats, maps, tables and payment services. The object of this research is the process of organizing group trips when people use many different digital tools at the same time. The subject is the architecture and modules of a client-server system for group trip planning. The main tasks were to find the problems that appear when people try to coordinate a group trip; to define what such a platform needs to have; to design a system with an interactive map, chat, notifications and a financial module. Methods of system analysis, object-oriented design and software architecture modelling were used. The result is a platform concept that puts route planning, communication and step-by-step payments with participant voting all in one place.

**Keywords:** Group Trip Planning Platform, Client-server Architecture, Web Interface, Mobile Application, Interactive Map, Online Chat, Notifications, Participant Voting, Staged Payments, Organizer Deposit.

**Вступ.** Планування групової подорожі зазвичай ускладнюється не маршрутом, а координацією людей. Один користувач бронює квитки чи житло, інші долучаються пізніше, домовленості змінюються, а питання оплати виникають дуже швидко. Популярні інструменти вирішують лише окремі задачі. Месенджери підходять для спілкування, але не забезпечують структурованого бюджету. Таблиці дозволяють записувати витрати, однак незручні для щоденної взаємодії. Карти допомагають із локаціями та маршрутом, проте не підтримують фінансовий контроль і рольову співпрацю в межах однієї поїздки. У результаті користувачі постійно переходять між сервісами та можуть втрачати важливу інформацію або довіру.

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення концепції системи для планування

групових подорожей, яка об’єднує основні процеси поїздки в одному цифровому середовищі. Вона має підтримувати створення подорожі, координацію учасників, позначення важливих місць на карті, чат у реальному часі, сповіщення, обмін медіафайлами та безпечніший фінансовий сценарій для організатора й учасників.

**Постановка проблеми.** Головна практична складність полягає у відсутності єдиного середовища для повного життєвого циклу групової подорожі. Наявні рішення рідко поєднують планування, комунікацію та контрольовані платежі в одному інтерфейсі. Це створює розрізнені робочі процеси, слабку прозорість спільних витрат і ризики, коли організатор сплачує за групу наперед. Тому потрібна система, яка зберігає дані про поїздку, упорядковує взаємодію користувачів, підтверджує витрати та підтримує справедливе повернення коштів.

**Основна частина.** Запропонована система розглядає подорож як спільний проєкт із ролями, діями та перевіреними подіями [1]. Її архітектура охоплює веб-клієнт, мобільний клієнт і серверну платформу [2]. Сервер надає REST-ендпоінти для основних операцій [3], а чат і миттєві сповіщення працюють через WebSocket-комунікацію [4]. Бекенд доцільно поділити на окремі модулі: автентифікація, профілі користувачів, подорожі, учасники, чат, сповіщення, медіаматеріали та фінансовий блок [5]. Для кращого розуміння загальної роботи системи варто розглянути її структуру. Основні складові платформи та зв’язки між ними подано на рис. 1.

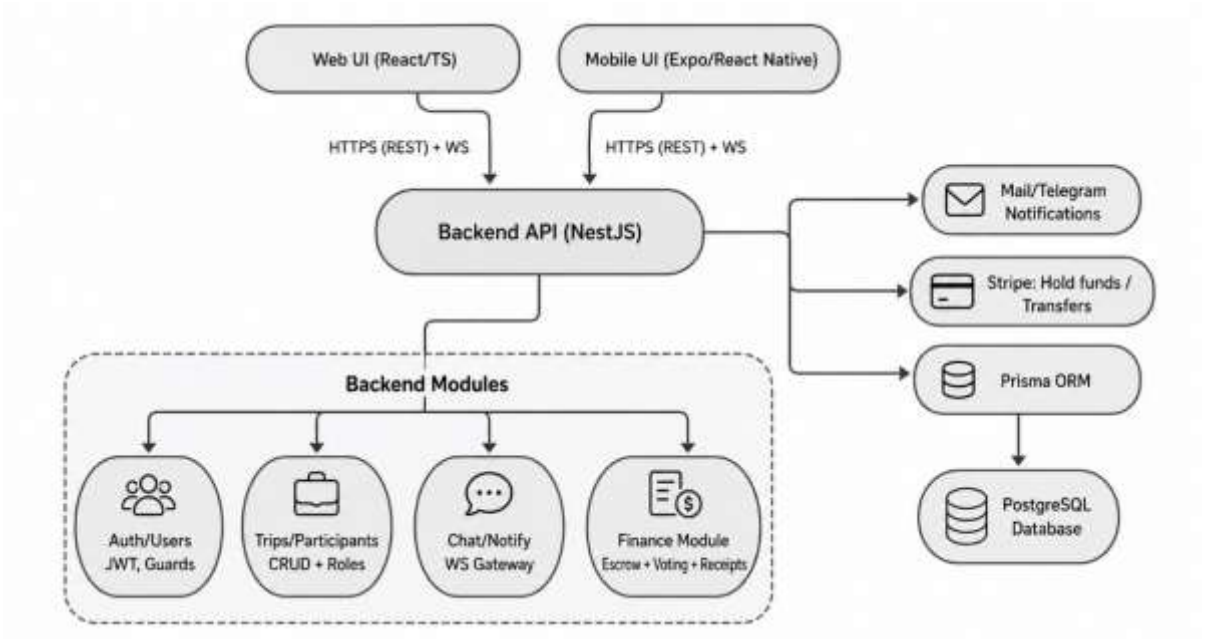



Рис. 1. Загальна структура системи

На рис. 1 відображено узагальнену архітектуру рішення, до якої входять веб-клієнт, мобільний клієнт і серверна частина. Також показано принцип взаємодії цих компонентів між собою.

Ключовим елементом проєкту є фінансова модель. У реальних подорожах часто виникає ситуація, коли організатор спочатку самостійно оплачує певні витрати, а потім очікує компенсації від інших учасників. Такий підхід створює ризики як для організатора, так і для групи. Щоб зменшити ці ризики, кошти учасників пропонується зберігати у захищеному зовнішньому платіжному середовищі [6], а організатор має формувати поетапні запити на виплату та підтверджувати їх квитанціями. Кожен такий запит проходить голосування учасників, і лише після погодження кошти можуть бути перераховані [7]. Завдяки цьому фінансові дії стають зрозумілішими, прозорішими та зручнішими для перевірки. Щоб детальніше показати фінансову взаємодію між користувачами, цей процес варто розглянути послідовно.

Роботу фінансового механізму можна подати за допомогою нескладних формул. Для визначення суми, яку має внести кожен учасник, використовується проста залежність. суму внеску одного учасника:

$$C = \frac{S}{N}, \tag{1}$$

де $S$ – загальний попередньо визначений бюджет подорожі, $N$ – кількість людей у групі. Отже, кожен учасник покриває однакову частку від повної вартості поїздки.

Окремо потрібно враховувати повернення коштів користувачу, який вирішив вийти з подорожі. Розмір такого повернення залежить від того, яка частина витрат на цей момент уже була затверджена. Логіку розрахунку можна пояснити такою формулою:

$$R(u) = \begin{cases} C, \\ \max\left(0, C - \frac{E^{approved}}{N}\right), \\ 0, \end{cases} \tag{2}$$

де $R$ означає суму компенсації, яку може отримати користувач, $C$ – його початковий внесок, а $E^{approved}$ – частину коштів, уже використану та погоджену учасниками. Таким чином, людині повертається лише та частина внеску, яка ще не була витрачена.

На рівні зберігання даних доцільно застосовувати реляційну базу даних і ORM-схему, що дозволяє керувати подорожами, платежами, квитанціями, голосуваннями, повідомленнями чату та сповіщеннями [8-10]. Клієнтська частина має містити сторінки реєстрації, редагування профілю, перегляду публічних і приватних подорожей, деталей поїздки, фінансових екранів, планування на карті та спільного альбому спогадів. Завдяки цьому система залишається корисною не лише на етапі підготовки, а й під час самої подорожі та після її завершення.

**Висновки.** У статті описано концепцію платформи для організації групових подорожей, яка об’єднує засоби планування, комунікацію та контрольовану фінансову взаємодію в одному цифровому продукті. Запропоноване рішення здатне зменшити неузгодженість у діях учасників, зробити спільні витрати прозорішими та підвищити рівень довіри між організаторами й учасниками. Основна цінність роботи полягає у поєднанні колективного планування поїздки з поетапними виплатами, голосуванням і правилами повернення коштів у межах єдиної клієнт-серверної системи. Подальше вдосконалення може передбачати розширену репутаційну модель, ефективніший механізм розв’язання спірних ситуацій, глибшу аналітику та повнішу підтримку промислового впровадження мобільного застосунку.

## Список використаних джерел


1. Evans, E.: Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software, Addison-Wesley Professional, Boston, pp. 210-215, (2003).
2. Richards, M., Ford, N.: Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach, O'Reilly Media, Sebastopol, pp. 120-125, (2020).
3. Masse, B.: REST API Design Rulebook, O'Reilly Media, Sebastopol, pp. 45-50, (2011).
4. Kurose, J. F., Ross, K. W.: Computer Networking: A Top-Down Approach, Pearson, Boston, pp. 420-425, (2016).
5. Holmes, S.: Getting MEAN with Mongo, Express, Angular, and Node, Manning Publications, Shelter Island, pp. 240-245, (2019).
6. Schueffel, P.: The Concise Fintech Compendium, School of Management Fribourg, Fribourg, pp. 85-90, (2017).
7. Chishti, S., Barberis, J.: The FINTECH Book: The Financial Technology Handbook for Investors, Entrepreneurs and Visionaries, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 130-135, (2016).
8. Kleppmann, M.: Designing Data-Intensive Applications, O'Reilly Media, Sebastopol, pp. 75-80, (2017).
9. Wieruch, D.: The Road to React, Independently published, pp. 150-155, (2021).
10. Arora, A.: Mastering React Native, Packt Publishing, Birmingham, pp. 110-115, (2020).

# PACS-СИСТЕМИ У ЗАКЛАДАХ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ: ТЕХНІЧНІ ТА СТРАТЕГІЧНІ ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ

**Романюк О.О., Скибчик В.В.**
Інститут Інформаційних технологій та систем НАН України, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі систематизовано технічні та стратегічні проблеми впровадження систем архівування та передачі медичних зображень (PACS, Picture Archiving and Communication System) у закладах охорони здоров'я України на основі практичного досвіду реалізації проєктів у медичних закладах різного рівня. Виокремлено типові технічні бар'єри: фрагментованість DICOM-середовищ, феномен "псевдо-PACS" (файлові сховища без повноцінного DICOM-функціоналу), неповна інтеграція з медичними інформаційними системами (МІС) та національною електронною системою охорони здоров'я (eHealth), нерівномірна сумісність обладнання різних виробників, недостатній рівень кібербезпеки. На стратегічному рівні проаналізовано відсутність національної архітектури медичної візуалізації, недоліки закупівельних процедур щодо вимог DICOM Conformance та профілів IHE (Integrating the Healthcare Enterprise), ризики безпеки даних в умовах гібридної війни. Запропоновано концептуальні підходи до формування національної PACS-екосистеми: гібридна архітектура з георезервуванням, стандарти DICOMweb та FHIR Imaging для інтероперабельності, профіль IHE XDS-I для крос-інституційного обміну, підготовка PACS-інфраструктури як передумови для впровадження ШІ-діагностики.

**Ключові слова:** PACS, медична візуалізація, DICOM, eHealth, IHE, інтероперабельність, кібербезпека, штучний інтелект у медицині.

# PACS SYSTEMS IN UKRAINIAN HEALTHCARE INSTITUTIONS: TECHNICAL AND STRATEGIC IMPLEMENTATION CHALLENGES

**Romaniuk O. O., Skybchyk V.V.**
Institute of Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper systematizes technical and strategic challenges of Picture Archiving and Communication System (PACS) implementation in Ukrainian healthcare institutions based on practical project experience across medical facilities of different levels. Typical technical barriers are identified: fragmentation of DICOM environments; the "pseudo-PACS" phenomenon (file storage without full DICOM functionality); incomplete integration with hospital information systems (HIS, RIS) and the national eHealth platform; uneven interoperability across vendor equipment; insufficient cybersecurity posture. At the strategic level, the absence of a national medical imaging architecture is analyzed, along with shortcomings of procurement procedures regarding DICOM Conformance and IHE profile requirements, and data security risks under conditions of hybrid warfare. Conceptual approaches are proposed for forming a national PACS ecosystem: hybrid architecture with geographic redundancy; DICOMweb and FHIR Imaging standards for interoperability; the IHE XDS-I profile for cross-institutional image exchange; PACS infrastructure preparation as a prerequisite for clinical AI diagnostics.

**Keywords:** PACS, medical imaging, DICOM, eHealth, IHE, interoperability, cybersecurity, artificial intelligence in healthcare.

**Вступ.** Цифрова трансформація системи охорони здоров'я України за останні роки досягла значного прогресу завдяки впровадженню електронної системи охорони здоров'я (eHealth), електронних медичних записів, цифрового документообігу та електронного рецепта [3]. Водночас один із критично важливих шарів цифрової медицини – інфраструктура зберігання, обробки та обміну медичними зображеннями (Picture Archiving and Communication System, PACS) [5] – залишається фрагментованою, нерівномірно розгорнутою і неінтегрованою до національної архітектури охорони здоров'я. В умовах повномасштабної війни, руйнування медичних закладів, переміщення великих груп пацієнтів та зростання потреби в телерадіології ця прогалина набуває критичного характеру.

**Мета роботи.** Метою роботи є виявлення та систематизація технічних і стратегічних проблем впровадження PACS-систем у закладах охорони здоров'я України на основі досвіду практичних впроваджень, а також формулювання концептуальних підходів до побудови національної PACS-екосистеми, інтегрованої з системою eHealth і готової до використання технологій штучного інтелекту в медичній діагностиці.

**Постановка проблеми.** Аналіз досвіду впроваджень PACS у закладах охорони здоров'я України різного рівня – районному, обласному, приватному та військовому – дозволяє виокремити дві групи системних проблем: технічні та стратегічні.

До *технічних* належать: (1) фрагментованість і відокремленість наявних PACS – відсутність стандартизованих каналів обміну дослідженнями між закладами; (2) феномен "псевдо-PACS" – використання файлових серверів або проміжних рішень без повноцінної DICOM-функціональності (Modality Worklist, Query/Retrieve, Structured Reporting) [1]; (3) неповна або відсутня інтеграція з медичними інформаційними (MIC) та радіологічними інформаційними (PIC) системами, а також із національною eHealth-екосистемою; (4) нерівномірна DICOM-сумісність обладнання різних виробників, відсутність вимог до DICOM Conformance Statement при закупівлях; (5) недостатній рівень кібербезпеки PACS-середовищ – відсутність DICOM TLS, належної мережевої сегментації, аудиту доступу; (6) низька відмовостійкість і відсутність процедур відновлення даних після інцидентів.

До *стратегічних*: (1) відсутність національної політики розгортання та масштабування PACS-інфраструктури; (2) брак вимог до інтероперабельності (зокрема профілів IHE: SWF, XDS-I, PIX/PDQ) [2] на рівні закупівельних процедур; (3) непідготовленість інфраструктури до впровадження систем штучного інтелекту в радіології, для яких PACS є необхідним базовим шаром; (4) відсутність національної моделі обміну зображеннями для евакуйованих та переміщених пацієнтів; (5) низький рівень "PACS-культури" серед клініцистів – навіть за наявності системи лікарі продовжують вимагати плівку або CD-носії, не використовуючи інструменти діагностичної робочої станції.

**Основна частина.**

**1. Аналіз стану впроваджень.** На основі реальних кейсів впровадження PACS у закладах різних типів, прикладом може слугувати обласна лікарня з обсягом близько 50 тис. досліджень за рік виявлено типові патерни. Закупівля діагностичних комплексів (КТ, МРТ, ангіографія) часто здійснюється без супутньої PACS-інфраструктури; результатом стає цифровий ізоляціонізм — дослідження записуються на CD або друкуються на плівку, а централізованого архіву не виникає. У низці випадків формально встановлений "PACS" виявлявся файловим сервером без DICOM-вузла, що унеможливлює інтеграцію з робочими станціями радіологів та консультативними сервісами.

**2. Технічні рішення, що довели ефективність.** Серед перевірених підходів: (а) комбінована архітектура з локальним коротко- і середньотерміновим архівом і хмарним довготривалим сховищем (long-term storage) [4], що знижує капітальні витрати на дискову інфраструктуру, а також забезпечує георезервування; (б) застосування стандартів DICOMweb (WADO-RS, STOW-RS, QIDO-RS) для інтеграції з зовнішніми сервісами та порталами для лікарів; (в) впровадження профілю IHE XDS-I.b [7] для крос-інституційного обміну зображеннями; (г) використання DICOM TLS, VPN-каналів та сегментації мережі для забезпечення конфіденційності медичних даних [6]; (д) автоматизована анонімізація DICOM-тегів для безпечної передачі досліджень дослідницьким та ШІ-системам.

**3. Стратегічні передумови формування PACS-екосистеми.** Ефективне національне впровадження PACS в Україні має базуватися на: (а) референтній архітектурі медичної візуалізації, інтегрованій з eHealth через FHIR ImagingStudy та профіль IHE XDS-I; (б) стандартизованих закупівельних вимогах щодо DICOM Conformance Statement та обов'язкових IHE-профілів; (в) регуляторно закріпленій моделі довготривалого зберігання DICOM-даних з урахуванням законодавчо встановлених строків; (г) хмарно-гібридних рішеннях із георезервуванням як механізмі відмовостійкості в умовах війни; (д) системній

підготовці кадрів — радіологів, клініцистів, IT-фахівців — до роботи з PACS-середовищами на рівні медичних і технічних університетів.

**4. PACS як основа ШІ-діагностики.** Без розгорнутої та стандартизованої PACS-інфраструктури масштабне впровадження ШІ-моделей медичної візуалізації в Україні є технічно неможливим. PACS виконує три ключові функції в процесі інтеграції ШІ: (1) забезпечує точку інтеграції ШІ-сервісів через DICOMweb / DICOM SR; (2) є джерелом структурованих даних для тренування локальних моделей; (3) є каналом доставки результатів ШІ у клінічний робочий процес радіолога через hanging protocols. Відповідно, національна стратегія ШІ у медицині має стартувати з PACS-стандартизації, а не як окремий, паралельний трек.

**Висновки.**

1. Сучасний стан впровадження PACS в Україні характеризується значною фрагментованістю, переважанням відокремлених і часто неповнофункціональних рішень, відсутністю національної архітектури обміну медичними зображеннями та інтеграції з eHealth.

2. Подолання цих обмежень потребує одночасних дій на технічному (стандартизація DICOM, IHE-інтероперабельність, кібербезпека, відмовостійкість) і стратегічному (національна референтна архітектура, закупівельна політика, підготовка кадрів, культура використання) рівнях.

3. Формування національної PACS-екосистеми є необхідною передумовою як для повноцінного функціонування телерадіології в умовах війни та постконфліктного відновлення, так і для подальшого впровадження систем штучного інтелекту в медичній діагностиці.

## Список використаних джерел


1. DICOM Standard, PS3.1: Introduction and Overview. — National Electrical Manufacturers Association (NEMA), 2024. — URL: https://www.dicomstandard.org/.
2. IHE Radiology Technical Framework, Vol. 1 (RAD TF-1): Cross-Enterprise Document Sharing for Imaging (XDS-I.b). — IHE International, 2023.
3. HL7 FHIR Release 5: ImagingStudy Resource. — HL7 International, 2023. — URL: https://hl7.org/fhir/imagingstudy.html.
4. Козак Л., Романюк О., Коваленко О., Пезенцалі Г., Азархов О. Метод збереження цифрових медичних зображень для подальшого використання в лікувально-діагностичному процесі // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. — 2025. — № 51. — С. 208–215. — DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344911.
5. França R. P., Monteiro A. C. B., Arthur R., Iano Y. An overview of the impact of PACS as health informatics and technology e-health in healthcare management // Cognitive Systems and Signal Processing in Image Processing / Ed. by Y.-D. Zhang, A. K. Sangaiah. — Academic Press, 2022. — P. 101–128. — DOI: 10.1016/B978-0-12-824410-4.00007-6.
6. Eichelberg M., Kleber K., Kämmerer M. Cybersecurity in PACS and Medical Imaging: an Overview // Journal of Imaging Informatics in Medicine. — 2020. — DOI: 10.1007/s10278-020-00393-3.
7. Bhatt C., Bhatt N., Bhatt S. et al. Integrating and Adopting AI in the Radiology Workflow: A Primer for Standards and Integrating the Healthcare Enterprise (IHE) Profiles // Radiology. — 2024. — DOI: 10.1148/radiol.232653.

# ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ У КОМБІНОВАНОМУ ПІДХОДІ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

**Супруненко О.[1], Badri Gechbaia[2], Онищенко Б.[1], Гребенович Ю.[1]**
[1]Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
[2]Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

**Анотація**. Мета роботи полягає у вдосконаленні комбінованого підходу, який полягає у послідовному визначенні порядку аналізу програмної системи починаючи від невеликих її компонентів, PN-субмоделі яких досліджуються з використанням інваріантного аналізу основних динамічних характеристик, до груп компонентів, для аналізу яких потрібно проводити згортку процесів, що не впливають на основні зв'язки між компонентами. Завдання роботи – визначення правил розбиття моделі на субмоделі, які врахували б числові показники властивості керованості та надали б можливість її оцінки в процесі збірки моделі з субмоделей. Об'єктом дослідження є процес аналітичного дослідження PN-моделі програмної системи; предметом дослідження є аналіз динамічної характеристики керованості (повної/неповної) для субмоделей PN-моделі ПС. Методи досліджень: компонентно-орієнтоване імітаційне моделювання PN-моделей, комбінований підхід до імітаційного моделювання програмних засобів з паралелізмом, аналітичне визначення динамічних характеристик PN-моделей. Результати досліджень: правила розбиття PN-моделі на субмоделі для розрахунку проміжкової й підсумкової оцінки результатів аналітичного розрахунку властивості повної керованості субмоделей в залежності від особливостей їх відділення від PN-моделі ПС.

**Ключові слова**: мережі Петрі, PN-модель програмної системи, комбінований підхід до імітаційного моделювання програмного забезпечення, інваріантний аналіз PN-моделі.

# IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DETERMINING DYNAMIC PROPERTIES IN COMBINED APPROACH TO MODELING SOFTWARE SYSTEMS

**Suprunenko O.[1], Badri Gechbaia[2], Onyshchenko B.[1], Grebenovych J.[1]**
[1]The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
[2]Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia

**Abstract**. The purpose of the work is to improve the combined approach. It consists of consistently determining the order of analysis of a software system starting from its small components, the PN submodels of which are studied using invariant analysis of the main dynamic characteristics, to groups of components, for the analysis of which it is necessary to carry out the convolution of processes that do not affect the main connections between components. The task of the work is to determine the rules for dividing the model into submodels, which would take into account the numerical indicators of the controllability property and would provide the possibility of its evaluation in the process of assembling the model from submodels. The object of the study is the process of analytical study of the PN model of software system; the subject of the study is the analysis of the dynamic characteristic of controllability (complete/incomplete) for the submodels of the PN model. Research methods: component-oriented simulation modeling of PN models, a combined approach to simulation modeling of software tools with parallelism, and analytical determination of the dynamic characteristics of the PN models. Research results: rules for dividing the PN model into submodels for calculating the intermediate and final assessment of the results of analytical calculation of the full controllability property of submodels, depending on the features of their separation from the PN model of the aircraft.

**Keywords**: Petri nets, PN-model of software system, combined approach to software simulation modelling, invariant analysis of the PN-model.

**Вступ**. При дослідженні моделей програмних систем (ПС) потрібно враховувати, що у визначеній структурі компонентів системи реалізуються функціональні вимоги, які повинні забезпечувати передбачувану поведінку ПС при будь-якій зовнішній функціональній взаємодії та вхідних даних. Задачу перевірки надійності функціонування програмних систем вирішують на динамічних моделях, важливою характеристикою яких має бути не лише зручність візуального аналізу моделі розробником, а й можливість автоматизованого аналізу

її динамічних характеристик. Це важливо як при проектуванні ПС, що дозволяє перевірити сформовані проектні рішення, так і при обслуговуванні ПС, коли потрібно розібратись з численними помилками і збоями в системі, та внести обґрунтовані зміни.

Задача перевірки надійності моделей ПС ускладнюється необхідністю комплексного підходу до аналізу динаміки системи, яка характеризується великою кількістю елементів, функціональною та інформаційною складністю. Аналіз динамічних характеристик, зокрема покриття та досяжності, вирішується побудовою дерева досяжності [1] чи застосуванням інваріантного аналізу [2], який дозволяє перевірити дотримання й інших динамічних характеристик, таких як збережуваність і повторюваність.

**Мета роботи** полягає у вдосконаленні підходу до дослідження динамічних характеристик ПС [3], що полягає у послідовному аналізі моделей компонентів, підсистем і їх часткових збірок, які побудовані на основі мереж Петрі. Аналіз проводиться на базі статичних [4] характеристик PN-моделі ПС та інваріантного методу [2], за результатами яких відбувається корегування моделі, що здійснюється у процесі поступового приєднання PN-моделей компонентів до перевіреної частини PN-моделі ПС. Такий інструментарій дозволяє моделювати складні процеси з паралельними та конкуруючими підпроцесами в ПС та аналізувати динамічні властивості [5] за рахунок того, що має строгий математичний опис PN-елементів моделі, який використовується у аналітичному дослідженні ПС.

**Постановка проблеми**. Сучасне програмне забезпечення має оперувати великими обсягами даних, забезпечуючи їх складну та багатоетапну обробку в умовах жорстких обмежень. Тому до нього пред'являються підвищені вимоги щодо надійності [6]. Натомість при розробці та розвитку ПС розробники часто зустрічаються з необхідністю перевірити проєктні рішення на критичні помилки: відсутність тупиків [7], нескінченних циклів, непередбачуваної поведінки. При цьому складність програмних систем незмінно зростає [6].

Відсутність неочікуваної поведінки ПС можна перевірити, використовуючи аналіз побудови покриваючого дерева, але при великій кількості елементів моделі виникає проблема «вибуху станів». При застосуванні матричних методів опису PN-моделі теж є обмеження на кількість елементів, які дозволяє подолати комбінований підхід до імітаційного моделювання ПЗ [3, 8], який передбачає перевірку PN-субмоделей. При цьому у субмоделях спостерігається недотримання властивості «повної керованості», що викликане розбиттям цілісної моделі на частини [8]. Треба сформувати правила оцінки «повної керованості» на рівні субмоделей, які враховують ці недоліки, а також способи розбиття моделі на частини.

**Розв'язання проблеми**. При побудові PN-моделі програмної системи в ній враховуються основні процеси, які забезпечуються компонентами та міжкомпонентною взаємодією. При аналізі моделей програмних систем виникає необхідність їх розділення на підсистеми, які можуть включати кілька компонентів до складу підсистеми. Ідеальним варіантом розділення можна вважати розбиття, яке починається з єдиної вхідної вершини місця і закінчується єдиною вихідною вершиною перехода чи вершиною місця.

Але часто цей варіант порушується через складну логіку, яка пов'язана з великою кількістю зв'язків між складовими ПС. Тому при збільшенні вхідних і вихідних вершин у отримуваних субмоделях виникає необхідність введення додаткових вершин і зв'язків, які використовують для замикання моделі (умова проведення інваріантного аналізу). Ці додаткові вершини і зв'язки при подальшому злитті підсистем у загальну модель будуть прибиратись, але при аналітичному дослідженні самих підсистем вони створюють додаткові невизначеності, що впливає на підрахунок рангу матриці інцидентності. Це значить, що відбувається вплив на властивість повної керованості, яка фактично не порушується [8], але однозначного підтвердження цього у числових параметрах не визначено. Це викликає невизначеність через вибір варіантів подальших дій: «потрібно корегувати саму субмодель?» чи «треба підключити субмодель до суміжних компонентів ПС і потім оцінювати властивість керованості?». Тому в роботі описані результати проведених експериментів з різними варіантами розбиття PN-моделі на субмоделі та визначені правила оцінки їх динамічних властивостей, які впливають на проведення аналізу субмоделей у визначений спосіб.

Зокрема, при відділенні фрагменту PN-моделі, який починається і закінчується вершиною місця чи переходу (рис. 1, а) різниця рангу матриці інцидентності W й мінімальної множини вершин місць чи переходів: *rang(W) – min(|T|,|P|)=1*, що вказує штучне замикання одного зв'язку через додаткову вершину переходу. Якщо кількість розірваних зв'язків більше 1 (рис. 1, б-в), то *rang(W) – min(|T|,|P|)≤2* при дотриманні інших динамічних властивостей за аналізом інваріантів [8]. Якщо різниця *(rang(W) – min(|T|,|P|))* більше двох, порушується властивість керованості, що потребує корегування моделі та її повторної перевірки.

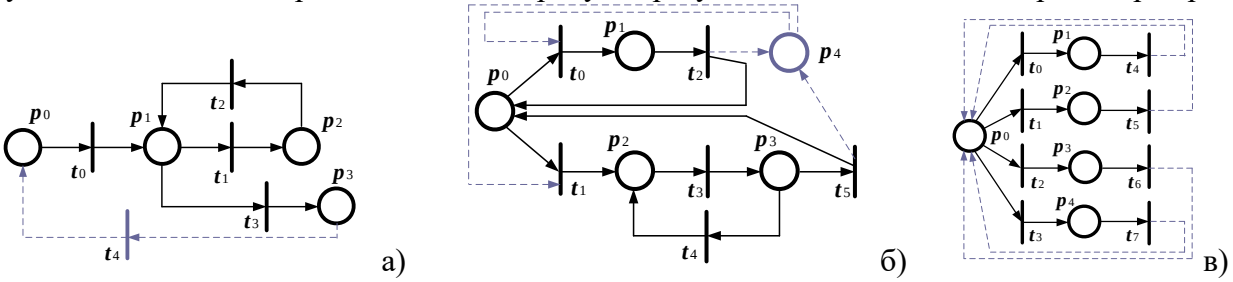



Рис. 1. Фрагменти PN-моделі: а – з одиничними входом та виходом, б – з двома входами та виходами; в – з множинними входами та виходами

**Висновки**. Таким чином, застосовуючи правила розбиття PN-моделей ПС на частини для аналітичного дослідження субмоделей можна передбачити, як треба відкорегувати результат розрахунку властивості керованості для конкретної субмоделі, щоб визначити потребу у її корегуванні на етапі локального аналітичного дослідження. Запропоновані правила оцінки динамічних властивостей субмоделей та способи розбиття PN-моделей на субмоделі дозволяють підвищити ефективність аналітичного дослідження моделі ПС на послідовних етапах аналізу її субмоделей та їх часткової збірки до повної моделі. Результати дослідження можуть використовуватись при проектуванні ПС та при перевірці проєктних рішень для розвитку програмних систем в період їх експлуатації.

**Список використаних джерел**


1. Kamiński, L. and Lasota, S. (2024). Bi-Reachability in Petri Nets with Data. *In 35th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2024). Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, Vol. 311, pp. 31:1-31:20 (Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik). https://doi.org/10.4230/LIPIcs.CONCUR.2024.31.
2. Koch, I., Reisig, W., & Schreiber, F. (Eds.). (2010). Modeling in systems biology: the Petri net approach (Vol. 16). Springer science & business media.
3. Suprunenko, O. (2021), Combined approach architecture development to simulation modeling of systems with parallelism. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(4(112)), 74-82. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239212.
4. Reisig W. (2016). Understanding Petri Nets: Modeling Techniques, Analysis Methods, Case Studies; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
5. Нестеренко Б.Б., Новотарський М.А. (2012). Формальні засоби моделювання паралельних процесів та систем // Праці Інституту математики НАН України. Том 90. Київ: Інститут математики НАН України. 334 с.
6. Tanenbaum A., Bos H. (2015). Modern operating systems. 4th ed. Pearson Prentice-Hall, 1106 p.
7. Suprunenko O.O., Onyshchenko B.O., Grebenovych J.E. (2022) Analysis of hidden errors in the models of software systems based on Petri nets. *Electronic Modeling*, Vol. 44, N. 2, 38-50. https://doi.org/10.15407/emodel.44.02.038.
8. Suprunenko, O., Onyshchenko, B., Grebenovych, J., Nedonosko, P. (2023). Applying a Combined Approach to Modeling of Software Functioning. *In: Faure, E., Danchenko, O., Bondarenko, M., Tryus, Y., Bazilo, C., Zaspa, G. (eds) Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2022. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 178. Springer, Cham, 30-48. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_3.

# SCENARIO-DRIVEN RUNTIME SYSTEM ЯК НОВА ПАРАДИГМА ПОБУДОВИ АДАПТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Шулаков В.В., Олексюк В.В., Заспа Г.О., Сіньковський А.П.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. У роботі запропоновано нову парадигму побудови адаптивних інформаційних систем – Scenario-Driven Runtime System (SDRS), яка передбачає динамічне формування поведінки системи на основі виконуваних сценаріїв. На відміну від традиційних підходів із фіксованою логікою, SDRS дозволяє визначати поведінку в процесі виконання через конкуренцію сценаріїв та механізмів агрегації підтримки. Метою дослідження є обґрунтування концепції SDRS та визначення підходу до прийняття рішень у такій системі. Об'єктом дослідження є адаптивні розподілені системи, предметом – механізми динамічного вибору поведінки. Для забезпечення узгодженості рішень запропоновано модель, що принципово відрізняється від класичних консенсусних алгоритмів, таких як Raft, оскільки не прагне досягнення єдиного узгодженого стану, а формує рішення як результат агрегованої підтримки сценаріїв із різнорідних джерел, реалізуючи механізм розподіленої валідації поведінки. Результати демонструють можливість поєднання адаптивності та узгодженості в межах єдиної моделі.

**Ключові слова:** SDRS, сценарій, адаптивні системи, runtime, консенсус, Raft, кворум.

# SCENARIO-DRIVEN RUNTIME SYSTEM AS A NEW PARADIGM FOR BUILDING ADAPTIVE INFORMATION SYSTEMS

**Shulakov V., Oleksiuk V., Zaspa H., Sinkovskyi A.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This paper proposes a novel paradigm for building adaptive information systems – Scenario-Driven Runtime System (SDRS), which enables dynamic behavior formation based on executable scenarios. Unlike traditional systems with fixed logic, SDRS determines behavior at runtime through scenario competition and support accumulation. The aim of the study is to justify the SDRS concept and define an approach to decision-making within such systems. The object of the research is adaptive distributed systems, while the subject focuses on dynamic behavior selection mechanisms. To ensure decision consistency, the integration of Raft consensus principles into the quorum formation process is proposed. The research methods include system analysis and conceptual modeling. The results demonstrate the feasibility of combining adaptability and consistency within a unified model.

**Keywords:** SDRS, scenario, adaptive systems, runtime, consensus, Raft, quorum.

**Вступ.** Сучасні інформаційні системи функціонують у середовищах із високим рівнем динамічності та невизначеності, що ускладнює використання традиційних підходів із заздалегідь визначеною логікою. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових парадигм [1-2], які дозволяють системам адаптувати свою поведінку під час виконання.

**Постановка задачі.** Традиційні програмні системи реалізують фіксовану логіку, що обмежує їхню здатність до адаптації. З іншого боку, розподілені системи потребують механізмів узгодженого прийняття рішень. Існує необхідність у підході, який поєднує динамічність поведінки з гарантіями узгодженості.

**Мета роботи**. Обґрунтування парадигми Scenario-Driven Runtime System (SDRS) та дослідження підходу до прийняття рішень у такій системі з урахуванням принципів консенсусних алгоритмів.

**Основна частина.** У запропонованій парадигмі SDRS поведінка системи визначається не наперед заданими алгоритмами, а множиною сценаріїв – активних одиниць, що описують можливі варіанти дій. Сценарії можуть одночасно існувати, виконуватись і конкурувати між собою. Ключовою характеристикою SDRS є використання механізму підтримки (support), який відображає рівень легітимності сценарію. Підтримка формується на основі сукупності факторів, зокрема оцінок агентів, фактичних показників роботи системи, політик та історії виконання.

Наукова новизна роботи полягає у запропонуванні SDRS як парадигми, що дозволяє розглядати поведінку системи як результат динамічної конкуренції сценаріїв, а не як реалізацію заздалегідь визначеної логіки. Модель принципово відрізняється від класичних консенсусних алгоритмів, таких як Raft [3], оскільки не прагне досягнення єдиного

узгодженого стану системи з жорсткими гарантіями коректності. Натомість вона оперує множиною альтернативних сценаріїв, що конкурують між собою, а рішення формується як результат агрегованої підтримки, отриманої з різнорідних джерел – локальних оцінок, runtime-метрик, керуючих політик та історичних даних. У такій парадигмі активація сценарію визначається не бінарним актом погодження, а рівнем його легітимності, що відображає ступінь узгодженої довіри системи до його доцільності, тим самим, реалізуючи механізм розподіленої валідації поведінки замість класичного глобального консенсусу. Архітектура запропонованого підходу представлена на рисунку 1.

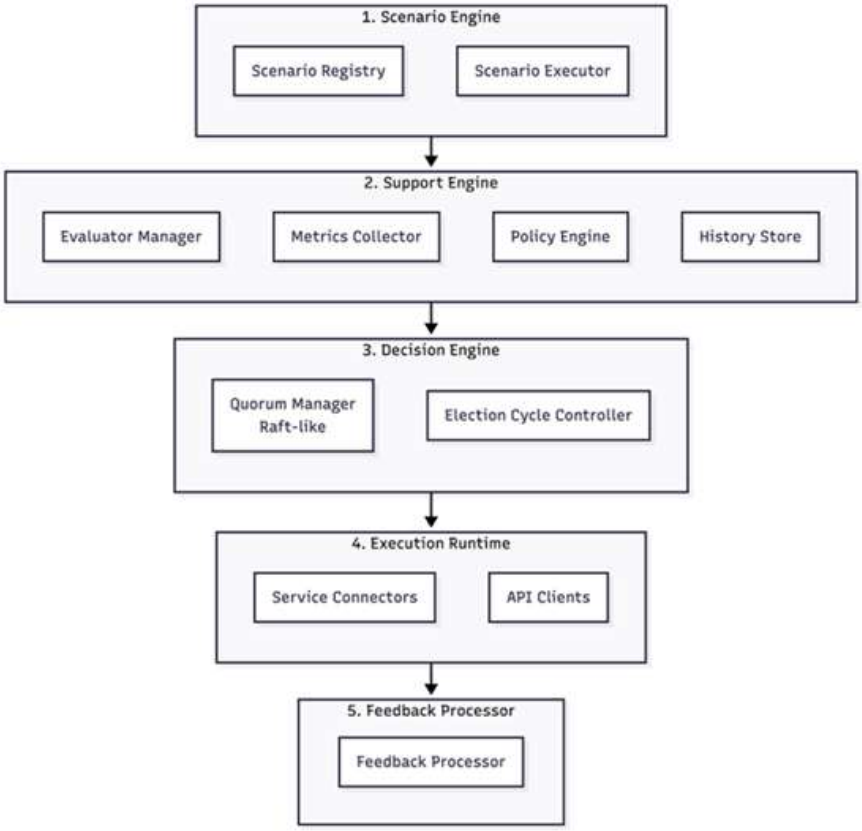



Рис. 1. Архітектура SDRS

Інтеграція архітектурного представлення системи з механізмами керування її runtime-поведінкою формує узгоджену відповідність між структурним і поведінковим рівнями SDRS.

**Висновки.** У роботі запропоновано парадигму Scenario-Driven Runtime System, яка забезпечує динамічне формування поведінки системи на основі конкуренції сценаріїв у runtime. Показано, що для формалізації процесу прийняття рішень можуть бути використані принципи розподіленого агрегування сигналів та кворум-подібні механізми, без прямого застосування класичних алгоритмів консенсусу. На відміну від традиційних підходів, запропонована модель не передбачає досягнення єдиного узгодженого стану, а реалізує механізм розподіленої валідації поведінки, де активація сценаріїв визначається рівнем їх підтримки з боку системи. Такий підхід поєднує адаптивність, децентралізованість і керованість та може бути застосований при побудові складних розподілених систем із динамічною поведінкою.

## Список використаних джерел


1. Yazdanian P. Towards Scenario-Driven Reference Architecture for Integrating Microservices and LLM-Based Multi-Agent Systems / P. Yazdanian, Y. Liu // 2025. P. 607–608. DOI: 10.1109/CASCON66301.2025.00107.
2. Weyns D. An Introduction to Self-Adaptive Systems: A Contemporary Software Engineering Perspective / D. Weyns. 2021. DOI: 10.1002/9781119574910.
3. Morabito G. Consensus-Based Distributed Orchestration Framework for Microservices in Edge Computing Clusters / G. Morabito, A. Ficara, A. Celesti, M. Villari, M. Fazio // Future Generation Computer Systems. 2025. Vol. 176. P. 108-221. DOI: 10.1016/j.future.2025.108221.

# SPATIAL IT-BASED DECISION SUPPORT FRAMEWORK FOR CRITICAL ROAD IDENTIFICATION UNDER NATURAL DISASTERS

**Batur M.[1], Shafapourtehrany M.[2,3], Karaman H.[4], Ergun B.[1]**
[1]Gebze Technical University, Gebze, Türkiye
[2]Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Türkiye
[3]Istanbul Provincial Directorate of Disaster and Emergency Management, Istanbul, Türkiye
[4]Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye

**Abstract**. This study evaluates post-earthquake emergency accessibility in the Ataşehir district of Istanbul, Türkiye, using a spatial IT-based decision support framework. The framework integrates spatial data, earthquake damage modeling, and network analysis to assess emergency response under a simulated earthquake scenario. A modified two-stage Dijkstra algorithm is applied to model emergency routing from an emergency station to the most damaged school and then to the nearest accessible hospital under both normal and disrupted conditions. Road blockages caused by debris from damaged buildings and bridges are incorporated into the routing cost function to simulate post-earthquake network conditions. A network criticality metric is used to quantify the effect of individual road disruptions on travel time and connectivity. Results show that damaged critical links significantly increase travel times, reduce network connectivity, and alter optimal hospital accessibility patterns. The findings highlight the importance of identifying critical road segments and maintaining network redundancy to support effective emergency response after seismic events.

**Keywords**: Spatial IT, Emergency accessibility, Road network analysis, Disaster impact, Modified Dijkstra, Post-disaster response.

**Introduction**. In the immediate aftermath of an earthquake, road networks play a vital role in emergency response by providing access for ambulances, rescue teams, and affected populations [1]. However, seismic impacts such as debris accumulation, road blockages, and bridge failures can severely disrupt network functionality and delay response operations. Importantly, not all road segments contribute equally to network performance: while some have alternative connections, others are critical for maintaining accessibility. Failure of these key links can significantly increase travel time and reduce connectivity across the transportation network [2]. Previous studies commonly apply shortest-path analysis within spatial network environments to estimate emergency accessibility; however, they often focus primarily on route optimization and pay limited attention to the functional importance of individual road segments under disrupted conditions [3-5]. In post-disaster environments, understanding how the failure of specific links affects accessibility is essential for emergency planning and response. Therefore, this study proposes a spatial IT-based decision support framework integrating earthquake damage modeling with network analysis to identify critical road segments and evaluate how their disruption influences emergency travel time, accessibility, and overall network performance.

**The purpose of the work** is to identify critical road segments that have the greatest impact on post-earthquake emergency accessibility by analyzing their influence on travel times within a spatial IT-based network.

**Formulation of the problem**. Post-earthquake network analysis shows that the disruption of certain road segments significantly increases shortest-path travel times, while others have little effect on overall accessibility.

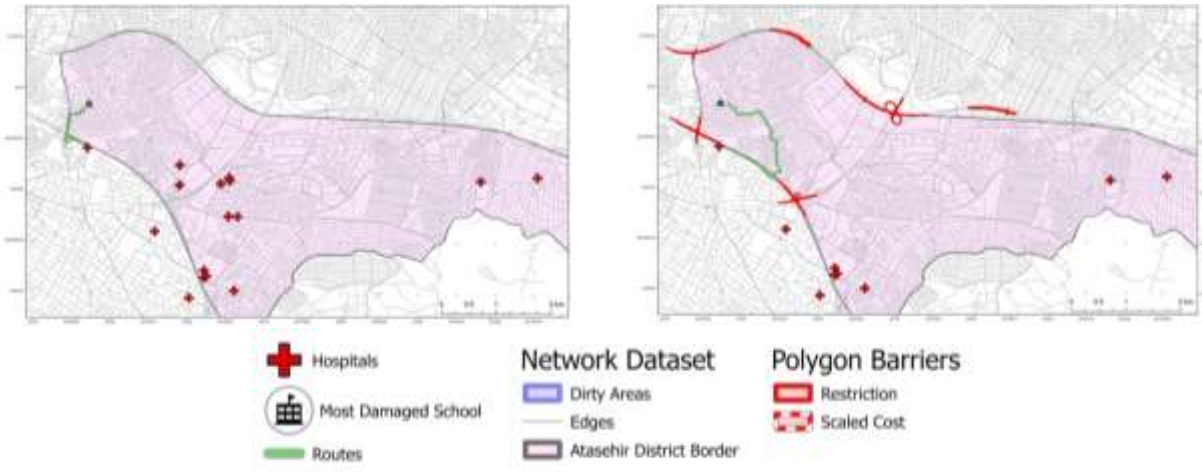
**Solving the problem**. The proposed framework evaluates post-earthquake accessibility in the Ataşehir district of Istanbul, Türkiye, under a simulated Mw 7.0 earthquake scenario. The network includes one emergency station, 11 hospitals, and one heavily damaged school requiring urgent response. Earthquake-induced debris blocks several road segments, reducing network functionality

and affecting emergency accessibility. The framework consists of three layers. The spatial data layer includes the road network, buildings, bridges, and emergency facilities. The model layer applies the HAZTURK methodology to estimate earthquake damage, identify debris from collapsed buildings and bridges, and overlay these impacts with the road network to detect blocked segments [6-7]. The decision-support layer evaluates accessibility and identifies critical roads using network analysis. Emergency routing is modeled using a modified Dijkstra's algorithm. Unlike the conventional approach [8], where edge cost is based only on travel time, the cost function was adapted to account for earthquake-related road blockages, as it is shown by expression (1):

$$C_i = \begin{cases} \infty, & b_i = 1, \\ t_i, & b_i = 0, \end{cases} \tag{1}$$

where $C_i$ is the routing cost of road segment $i$, and $t_i$ is the travel time in minutes, and $b_i$ is a binary blockage variable for road segment $i$. If $b_i = 1$, meaning the road is blocked, and the algorithm avoids it, while $b_i = 0$ refers to an open road, the algorithm uses it.

This allows blocked roads to be excluded from route selection while preserving normal travel-time weighting for accessible segments. The emergency response process follows two stages: (1) routing from the emergency station to the damaged school, and (2) routing from the school to the nearest accessible hospital based on minimum travel cost. The objective is to minimize total travel time across the emergency route. Dijkstra's algorithm was selected due to its robustness and suitability for weighted transportation networks with non-negative costs. Alternative algorithms such as A* or heuristic-based dynamic routing were not considered, since improving computational speed was not the main objective of this study.




(a) (b)

Fig. 1. Closest hospital to the most damaged school: (a) pre-disaster; (b) post-disaster

Table 1 summarizes the changes in travel time and network connectivity between the pre- and post-earthquake scenarios for the emergency station-school and school-hospital routes.

Table 1

**Impact of earthquake-induced road disruptions on emergency response time and network connectivity**

| Metric | From the emergency station to the damaged school | From the damaged school to the nearest hospital |
|---|---|---|
| Pre-earthquake time (min) | 11.58 | 3.63 |
| Post-earthquake time (min) | 11.83 | 8.69 |
| Time change (%) | +2.16 | +139.39 |
| Connectivity Pre-earthquake (%) | 100 | 100 |
| Connectivity Post-earthquake (%) | 80 | 71 |
| Connectivity loss (%) | 20 | 29 |

Network vulnerability is assessed by comparing travel times under normal and disrupted conditions. Criticality is defined as the relative increase in total travel time after road segment removal compared with the baseline scenario, while connectivity is evaluated through changes in reachable origin-destination pairs. Figure 1 presents one representative example of the optimal route from the damaged school to the nearest hospital before and after the earthquake. The comparison illustrates how road blockages alter accessibility, resulting in route changes and, in some cases, reassignment to a different hospital under post-earthquake conditions.

**Conclusion**. This study demonstrates how earthquake-induced road disruptions affect emergency accessibility in the Ataşehir district of Istanbul using a spatial IT-based decision support framework. By integrating spatial data, earthquake damage outputs, and a modified shortest-path routing approach, the framework evaluates how post-earthquake road blockages influence emergency access between critical facilities. The results show that even partial network disruption can substantially alter optimal routes, increase travel times, reduce connectivity, and change hospital accessibility patterns. The proposed network criticality metric effectively identifies road segments whose failure causes disproportionate impacts on emergency response performance. Connectivity analysis further confirms a reduction in reachable origin-destination pairs following the simulated Mw 7.0 earthquake scenario. Overall, the findings emphasize the importance of identifying and prioritizing critical road segments within emergency planning strategies. Strengthening network redundancy and preserving alternative access routes are essential to improving urban resilience and supporting effective post-disaster emergency response in earthquake-prone cities. This framework considers only stationary road blockages caused by debris from damaged buildings and bridges. Dynamic traffic congestion due to evacuation or increased vehicle demand was not included. Future studies may integrate traffic flow, evacuation demand, and real-time mobility data to improve post-disaster emergency accessibility assessment.

**Acknowledge**. This research was conducted under the 2218 Domestic Postdoctoral Research Fellowship Program (Project No. 125C123) supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkiye (TUBITAK).

## References

1. Francini, M., Gaudio, S., Salvo, C., Mazza, F., Donnici, A.: A method for the definition of emergency rescue routes based on the out-of-plane seismic collapse of masonry infills in reinforced-concrete-framed buildings. Sustainability, 14(22), pp. 15420, (2022). https://doi.org/10.3390/su142215420
2. Khademi, N., Balaei, B., Shahri, M., Mirzaei, M., Sarrafi, B., Zahabiun, M., Mohaymany, A. S.: Transportation network vulnerability analysis for the case of a catastrophic earthquake. International Journal of Disaster Risk Reduction, 12, pp. 234-254, (2015). https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.009
3. Redzuan, A. A. H., Zakaria, R., Anuar, A. N., Aminudin, E., Yusof, N. M.: Road network vulnerability based on diversion routes to reconnect disrupted road segments. Sustainability, 14(4), pp. 2244, (2022). https://doi.org/10.3390/su14042244
4. Yuan, J., Wang, H., Fang, Y.: Identification of critical links in urban road network based on GIS. Sustainability, 15(20), pp. 14841, (2023). https://doi.org/10.3390/su152014841
5. Balijepalli, C., Oppong, O.: Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas. Journal of Transport Geography, 39, pp. 145-155, (2014). https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.025
6. Bakioglu, G., Karaman, H.: Accessibility of medical services following an earthquake: a case study of traffic and economic aspects affecting the Istanbul roadway. International Journal of Disaster Risk Reduction, 31, pp. 403-418, (2018). https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.05.018
7. Konukcu, B. E., Karaman, H., Sahin, M.: Building damage analysis for the updated building dataset of Istanbul. Natural Hazards, 84(3), pp. 1981-2007, (2016). https://doi.org/10.1007/s11069-016-2530-7
8. Tarigan, D. P. N. B., Tristianti, D., Hidayanti, E. F., Prasetya, D. A., Fahrudin, T. M.: Dijkstra's algorithm for optimizing humanitarian aid distribution routes to flood victims in Cerme District, Gresik. Jurnal Aplikasi Sains Data, 2(01), pp.96-103, (2026). https://doi.org/10.33005/jasid.v2i1.32

# MULTI-CRITERION OPTIMIZATION TECHNOLOGY FOR SHORT-RANGE AND VISIBILITY AIR VEHICLE MODELS

**Chernetsky M., Tcachenko S., Lobunko O.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The rapid development and competition of air vehicles requires a significant reduction in the design cycle while simultaneously improving aerodynamic characteristics and survivability. Traditional methods of computational fluid dynamics and elasticity are resource-intensive, which often complicates the implementation of deep multi-criteria optimization at the design stage. The article proposes a new technology based on the integration of physically informed neural networks (PINN) and surrogate modeling. The PINN framework is used as a solver of the Navier-Stokes equations, which allows for rapid prediction of aerodynamic loads. To study the design solution space, an efficient global optimization algorithm based on Kriging metamodeling was used. The optimization process takes into account conflicting goals: maximizing flight duration (aerodynamic efficiency) and minimizing the effective scattering area (ESA). The Pareto-optimal fronts generated by the system provide various options for geometric parameters and external shape, adapted to specific mission profiles.

**Keywords**: Surrogate Modeling, Multi-Criteria Optimization, Effective Dissipation Area, Aerodynamic Shape, Generative Design.

**Introduction**. Analysis of recent research indicates a rapid transition from classical methods of air vehicle design to intelligent automation systems for finding the best solutions [1-10]. Fundamental approaches to aerodynamic design of aircraft models are set out in the works of Anderson (2024) and other scientists. However, to study the characteristics of modern aircraft models operating at $Re < 5 \cdot 10^5$, the approaches and models require additional theoretical and experimental development and appropriate refinements. It is important to note modern achievements in the use of physically based neural networks and the possibility of solving the Navier-Stokes equations without grid methods. In addition, these methods are actively applied to aerospace engineering problems, demonstrating the advantages of PINN when working with incomplete data. The use of Kriging methods for aerodynamic optimization of complex geometric objects is described in detail in the work of Drezek et al. (2023). Recent research by Keane (2022), Wang et al. (2023), Liao et al. (2026) focuses on multi-criteria optimization, where the trade-off between weight and flight range is considered. The issue of ESA calculations for various moving objects has been covered in many works. However, the integration of ESA calculations directly into a fast neural network-based optimization loop remains an underexplored area, which determines the direction of this work.

**The purpose of the work.** The aim of the work is to create a technology for optimizing design parameters $\vec{x}$, external shape, and internal power scheme of the semi-monocoque fuselage of air vehicles, which, unlike existing ones, uses physically informed neural networks to simultaneously take into account strength requirements $\sigma_i(\vec{x}) \leq [\sigma]$, stiffness $k_j(\vec{x}) \leq [k]$, aerodynamic efficiency $K_{aer}(\vec{x})$, ESA $\sigma_{frt}(\vec{x})$, masses $M_{str}(\vec{x})$, duration $T_{design\ cycle}$.

**Formulation of the problem**. The essence of the problem lies in the development and justification of a new technology, which allows to supplement, and in the future replace, discrete high-cost calculations (CFD+FEA) with continuous intelligent models (PINN), which provide synergy between the physical laws of aerodynamics and machine learning methods for the operational synthesis of a model air vehicles design with maximum aerodynamic efficiency $K_{aer}(\vec{x}) \rightarrow max$, flight duration $T_{flight}(\vec{x}) \rightarrow max$, minimal ESA $\sigma_{frt}(\vec{x}) \rightarrow min$.

**Solving the problem**. To solve the problem, a comprehensive approach is proposed, which includes: (1) development of a geometric model of the air vehicles using CAD modeling tools; (2) selection and use of composite (anisotropic) materials; (3) search and implementation of a semi-monocoque fuselage scheme for effective load distribution; (4) numerical modeling of the stress-strain state of design variants using the FEA method; (5) study of aerodynamic characteristics of

variants using CFD methods; (6) multi-criteria design optimization. Studies by other authors show that the use of modern IT tools allows reducing the development cycle of air vehicles by 30%, decreasing the number of unsuccessful full-scale tests and creating a model with maximum target efficiency. Optimization of design parameters is implemented in the Python program and is presented as a process of searching (Fig. 1) for the best combination of variable geometric, mass, strength and energy characteristics to simultaneously achieve target indicators:

$$K_{aer}(\vec{x}) \to \max,\ T_{flight}(\vec{x}) \to \max,\ \sigma_{frt}(\vec{x}) \to \min,\ M_{str}(\vec{x}) \to \min.$$

PINN is used, which minimizes the loss functional, which includes the inconsistency of partial differential equations. To simulate the flow fields around the outer surface of the air vehicles model, the system of equations (1), (2) for an incompressible ($\rho$ = const) viscous gas (air) flow is used

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u})\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{f}. \tag{2}$$

$\rho$ – density of the air environment; $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ – local change in velocity over time; $\frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y}, \frac{\partial u_z}{\partial z}$ – change in speed in space; $\mathbf{u}\cdot\nabla\mathbf{u}$ – convective term describing the change in velocity due to air movement in space; $-\nabla p$ – pressure gradient; $\mu\nabla^2\mathbf{u}$ – diffusion term of the equation; $\mu$ – dynamic viscosity of air; $\mathbf{f}$ – external forces acting on the volume of air.

The model loss function is defined as

$$L = \omega_{data}MSE_{data} + \omega_{pde}MSE_{pde} + \omega_{bc}MSE_{bc}. \tag{3}$$

$MSE_{data}$ – data error; $MSE_{pde}$ – error in modeling a physical process; $MSE_{bc}$ – error of the specified boundary conditions; $\omega_{data}$, $\omega_{pde}$, $\omega_{bc}$ – weighting factors.

This allows the neural network to act as a meshless solver, providing high accuracy with significantly lower memory consumption compared to the classical finite volume method. ESA calculation criterion $\sigma_{frt} \to min$ implemented through evaluation

$$\sigma_{frt}(\vec{x}) = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{P_S}{P_i}. \tag{4}$$

$R$ – distance; $P_S$ – scattered signal flux density; $P_i$ – signal flux density.

The approach is integrated into the optimization cycle for instant assessment of the impact of aerodynamic shape changes on the ESA of the model air vehicle. The technology for optimizing the parameters of short-range and visibility air vehicles includes four main modules: (I) initialization, (II) intelligent modeling, (III) adaptive optimization, (IV) solution synthesis.

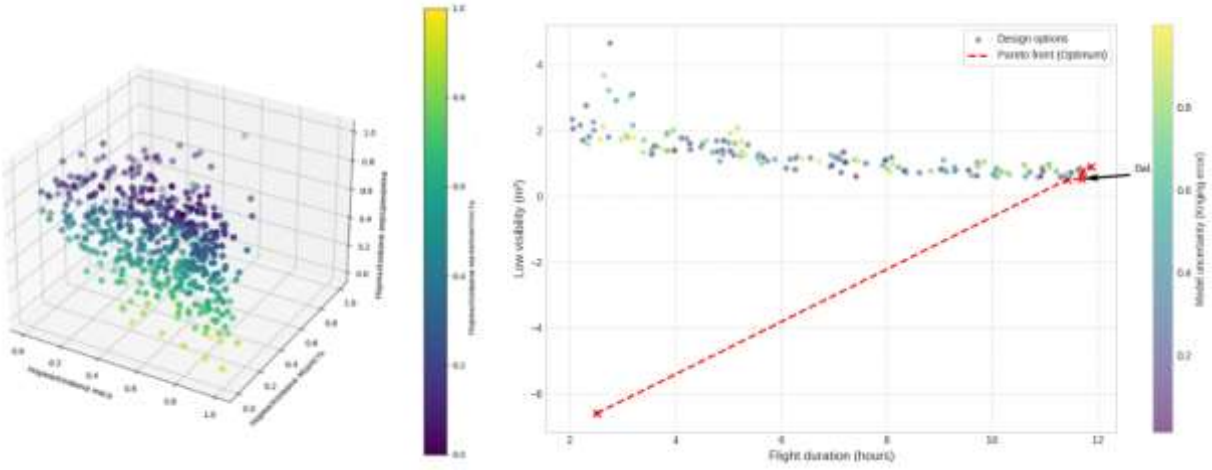



Fig. 1. Visualization of the search for the best design parameters

The initial stage involves the formation/refinement of input parameters and mission targets $\{L,\ M_{takeoff},\ V_{keyserian},\ H\}$. Determining the range of possible variation of variable geometric parameters $x_{i,min} \le x_i \le x_{i,max}$ parts of the air vehicle model. At the next stage, the PINN model is formed and trained, collocation points are generated in space around the outer surface of the complex shape of the air vehicle model. Physical constraints are set, and equations (1), (2) are integrated into the loss function (3) of the neural network. Training and adjustment of coefficients for obtaining fields are carried out $\vec{V}$, $\vec{p}$. Checking the adequacy of the model on several verified CFD calculations to minimize the error. In module (3), a multi-criteria optimization cycle is implemented, a sample of design solutions is generated. Construction of surrogate models and creation of response surfaces: $K_{aer}(\vec{x}), T_{flight}(\vec{x}),\ \sigma_{frt}(\vec{x}),\ M_{str}(\vec{x})$. Adaptive refinement by calculating the expected improvement function, selecting a point with a potential optimum, refining the characteristics at the selected point using the PINN model, updating the Kriging model. In module (4), the NSGA-II (Liao et al., 2026, Hao et al., 2022) genetic algorithm is implemented based on the refined surrogate model and the formation of the best compromise points in the axes of the objective functions (Fig. 1b). Expert selection (decision making) of the parameterized model air vehicle that best satisfies the conflicting requirements.

**Conclusion**. The integration of physical laws directly into the loss function (3) of the proposed model provides satisfactory physical reliability even with limited data.

The developed technology is an element of a decision support system for the operational synthesis of new air vehicle models, which balances operational efficiency and electromagnetic stealth.

Preliminary research results show that the use of modern IT tools allows you to reduce the development cycle of an air vehicle prototype by approximately 30%, significantly reduce the number of unsuccessful full-scale tests and create an acceptable parameterized model.

## References


1. Ren, Z.; Zhou, S.; Liu, D.; Liu, Q. (2025). Physics-Informed Neural Networks: A Review of Methodological Evolution, Theoretical Foundations, and Interdisciplinary Frontiers Toward Next-Generation Scientific Computing. *Appl. Sci*. 15, 8092. https://doi.org/10.3390/ app15148092
2. Kuang Luo, Jingshang Zhao, Yingping Wang, Jiayao Li, Junjie Wen, Jiong Liang, Henry Soekmadji, Shaolin Liao (2025). Physics-informed neural networks for PDE problems: a comprehensive review. *Artificial Intelligence Review*. 58:323. P.1-43 https://doi.org/10.1007/s10462-025-11322-7
3. Anderson, J. D., Cadou, C.P. (2024). Fundamentals of Aerodynamics. *McGraw-Hill Education*. 1142 p.
4. Wang, N., Chen, Y., & Wang, X. (2023). Multi-objective design optimization of a small UAV wing based on Kriging surrogate model. *Aerospace Science and Technology*, 132, 108045.
5. Cuomo, Salvatore & Schiano Di Cola, Vincenzo & Giampaolo, Fabio & Rozza, Gianluigi & Raissi, Maziar & Piccialli, Francesco. (2022). Scientific Machine Learning Through Physics–Informed Neural Networks: Where we are and What's Next. *Journal of Scientific Computing*. 92. 10.1007/s10915-022 01939-z.
6. Tarovyk V.V. & Lobunko O.P. (2025). Transformation mechanisms of vehicle wings. *Cogent Engineering*. Volume 12, Issue 1. https://doi.org/10.1080/23311916.2025.2579710
7. Lobunko, O., Kazantsev, B. (2023). Parameter modeling and synthesis of small-scale unmanned systems. In: *Abstracts of the International Scientific and Technical Conference "SDaS-2023"*, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 12-14 September.
8. Liao, J., Wang, G., Yang, M. (2026). Research on the optimization of penetrating nozzles using an algorithm NSGA-II. *Adv. Astronaut.* **9** , 225–240. https://doi.org/10.1007/s42423-026-00206-9
9. Hao, J.; Yang, X.; Wang, C.; Tu, R.; Zhang, T. An Improved NSGA-II Algorithm Based on Adaptive Weighting and Searching Strategy. *Appl. Sci*. 2022, **12**, 11573. https://doi.org/10.3390/ app122211573
10. Drezek, P.S.; Kubacki, S.; Zółtak, J. (2023). Kriging-Based Framework Applied to a Multi-Point, Multi-Objective Engine Air-Intake Duct Aerodynamic Optimization Problem. *Aerospace*, **10**, 266. https://doi.org/10.3390/ aerospace10030266.

# OPTIMIZING DRILLING PARAMETERS UNDER UNCERTAINTY: A COMPARATIVE STUDY OF METAHEURISTIC ALGORITHMS (PSO, GA) AND MACHINE LEARNING

**Dmytruk O., Rastsvietaiev V., Kaliuzhna T., Shypunov S.**
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** Drilling in heterogeneous formations is subject to substantial uncertainty in rock mechanical properties, pore pressure, and downhole dynamics, making deterministic parameter selection suboptimal. This work compares Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), and machine learning techniques – as well as their hybrids – for robust optimization of controllable drilling parameters (WOB, RPM, mud flow rate) aimed at maximizing rate of penetration (ROP) while constraining torque, vibrations, and tool wear under uncertain conditions.

**Keywords:** Drilling Optimization, Uncertainty, Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithm, Machine Learning, Rate of Penetration, Hybrid Metaheuristics.

**Introduction.** Geological variability and incomplete knowledge of formation properties lead to frequent deviation from optimal drilling regimes, resulting in reduced ROP, excessive vibrations, premature bit wear, and increased non-productive time. Conventional deterministic models rarely adequately account for these uncertainties.

**Work goal.** To evaluate and compare the effectiveness of PSO, GA, pure machine learning surrogates, and hybrid ML-metaheuristic approaches for drilling parameter optimization when input parameters are uncertain, and to formulate practical recommendations for method selection in field applications.

**Problem statement.** The optimization task is formulated as a stochastic problem: maximize expected ROP (or a multi-objective performance index) subject to probabilistic constraints on torque and vibration, where key model inputs follow probability distributions derived from logging data and geomechanical uncertainty quantification.

**Main part.** A unified benchmarking framework was developed for comparative evaluation of optimization methods under uncertainty. It incorporates physics-based and semi-empirical forward simulators, including the modified Bourgoyne-Young model for rate of penetration:

$$\mathrm{ROP} = f(\mathrm{WOB}, \mathrm{RPM}, \rho_m, d_b, \mathrm{UCS}, \dots), \tag{1}$$

torque-and-drag equations:

$$T = \mu \cdot \mathrm{WOB} \cdot r + T_0, \tag{2}$$

and frequency-domain vibration models.

Uncertainty propagation was performed through Monte Carlo sampling with $10^4$-$10^5$ realizations of uncertain inputs (rock strength UCS, friction coefficient $\mu$, pore pressure $P_p$, etc.), generating probabilistic distributions of the objective function (expected ROP) and constraints (torque $T \le T_{\max}$, lateral acceleration $a_{lat} \le 5$ g).

Direct metaheuristic optimization was carried out using:

– Particle Swarm Optimization (PSO) with adaptive inertia weight:

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \frac{t}{T_{\max}}, \tag{3}$$

and constriction factor $\chi$, population size 50–100, maximum 200–500 iterations;

– Genetic Algorithm (GA) with tournament selection (size 3–5), uniform crossover (probability 0.8–0.9), mutation rate 0.01–0.08, and elitism (2–5%).

Machine learning surrogates were constructed to approximate the expensive simulators: random forest ensembles (500–2000 trees), gradient boosting regressors, and feed-forward neural networks with 3–5 hidden layers and 64–256 neurons per layer, trained on datasets of 20 000–80 000 simulation points.

Hybrid schemes combined both approaches in two directions: ML surrogate prediction followed by PSO or GA refinement, and metaheuristic global search followed by ML-guided local refinement.

Evaluation covered three synthetic scenarios (carbonate ramp, clastic channel, overpressured shale) and one field dataset from Western Ukraine wells. Comparative metrics were mean / 90th-percentile ROP improvement, probability of constraint violation, wall-clock time (16-core server), and robustness to 50% higher uncertainty variance.

Results show pure PSO converges fastest (180–320 iterations to 1% tolerance) but is sensitive to premature convergence under strong uncertainty. GA offers better exploration, gaining 4–11% higher mean ROP in high-uncertainty cases at 1.8–2.7× higher cost. Standalone ML surrogates provide fast inference (0.01–0.1 s/eval) with 6.2–9.4% mean error, enabling extensive uncertainty sampling.

The hybrid ML-PSO approach achieves the best balance: 18–32% average ROP increase, 15–22% lower torque standard deviation, constraint violation probability <8% in 90% of realizations, and 12–18× computational speedup over direct metaheuristic methods (Fig. 1).

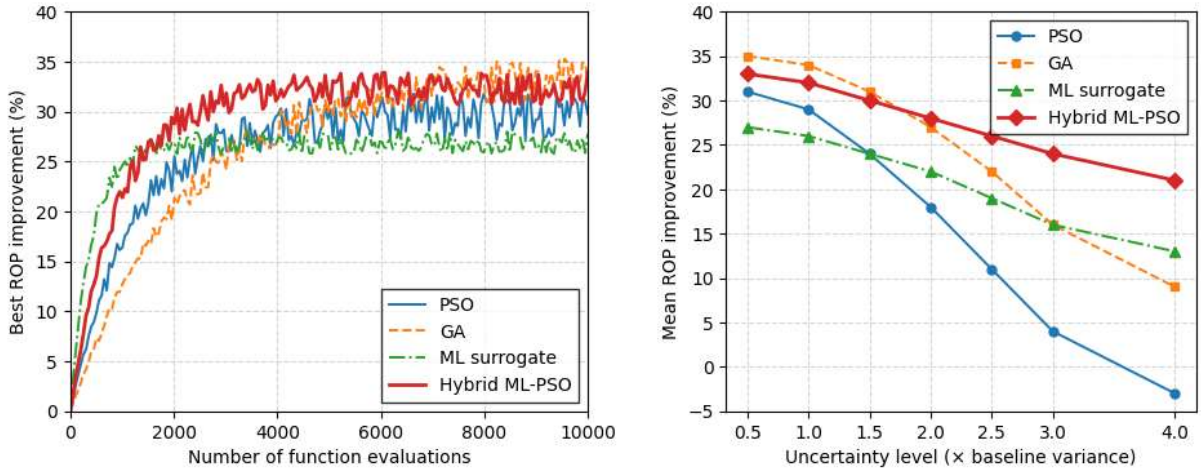



Fig. 1. Convergence curves and robustness comparison of PSO, GA, ML surrogate, and hybrid ML-PSO methods across increasing levels of input uncertainty

Sensitivity analysis confirms ML surrogates retain accuracy (error rise <4%) even with only 40–60% domain coverage in training data, while pure metaheuristics lose >15% ROP performance when uncertainty variance exceeds baseline by more than 40%.

**Conclusions.**

Hybrid machine learning–metaheuristic approaches, particularly ML-PSO, demonstrate superior performance for drilling parameter optimization under geological uncertainty. They combine the global search capability of PSO and GA with the fast, uncertainty-aware evaluation provided by trained surrogates, achieving average ROP improvements of 18–32 %, torque variation reduction by 15–22 %, and constraint violation probability below 8 % in the vast majority of uncertainty realizations, together with 12–18× computational speedup compared to conventional direct optimization methods.

## References

1. Samuel, R., & Agrawal, A. (2022). Making Under Uncertainty - Edge Intelligent Decision for Drilling: From Data to Actions in Real Time Well Engineering. In ADIPEC. SPE. ADIPEC. https://doi.org/10.2118/211840-ms
2. Gao, Y., Cui, J., & Wang, N. (2024). Multi-Objective Drilling Trajectory Optimization Under Parameter Uncertainty. In 2024 4th International Conference on Computer Science and Blockchain (CCSB) (pp. 11–14). IEEE. 2024 4th International Conference on Computer Science and Blockchain (CCSB). https://doi.org/10.1109/ccsb63463.2024.10735605

# ROBUST STABILITY ASSESSMENT OF UAV AIR SEGMENT USING MULTI-SENSOR DATA AND AUTOENCODER-BASED APPROACH

**Dudnik A.[1,2], Kvashuk D.[3], Fesenko A.[3], Savchenko A.[3], Mykolaichuk V.[1]**
[1] Taras Shevchenko National University, Kyiv
[2] Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine.
[3]National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine.

**Abstract**. The paper proposes an approach to assessing the stability of the UAV air segment based on multi-sensor data fusion and neural network processing. The method extends classical information-measurement systems used in electromechanical diagnostics to cyber-physical UAV systems operating under uncertainty. An Autoencoder-based model is applied for anomaly detection using propulsion parameters, inertial data, and control loop characteristics. A composite stability criterion is introduced, allowing real-time identification of instability caused by disturbances, delays, and sensor inconsistencies. The proposed approach ensures high accuracy and adaptability for UAV operation in dynamic environments.

**Keywords**: UAV, Stability, Multi-sensor fusion, Autoencoder, Cyber-physical system, Anomaly detection.

**Introduction**. Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) operate in complex and dynamic environments, where stability becomes a critical requirement for safe and efficient operation. Unlike traditional electromechanical systems, UAVs are influenced by multiple destabilizing factors such as aerodynamic disturbances, communication delays, and sensor noise. Classical diagnostic approaches developed for electric motors focus on measuring rotational parameters such as torque, angular velocity, voltage, and current . However, these approaches are not sufficient for UAV systems due to the need to process heterogeneous sensor data and account for nonlinear system dynamics. Therefore, there is a need to develop intelligent methods for real-time stability assessment of UAV air segments, capable of detecting anomalies and adapting to uncertain operating conditions.

**The purpose of the work** is to develop a method for assessing the stability of the UAV air segment through the integration of multi-sensor data, the application of neural network-based anomaly detection techniques, and the real-time evaluation of system behavior under conditions of uncertainty.

**Formulation of the problem**. The stability of a UAV air segment depends on a set of interconnected parameters, including propulsion system characteristics, inertial measurements obtained from IMU sensors, control loop latency, and the influence of environmental disturbances. Unlike electric motors, where stability is typically evaluated using torque and rotational speed, UAV systems require a more comprehensive assessment framework that integrates both physical dynamics and computational factors. Therefore, the problem lies in developing a unified criterion that enables real-time evaluation of UAV stability, ensures the detection of abnormal operating modes, and provides robustness to sensor noise and external disturbances.

**Solving the problem**. To solve the stated problem, a distributed cyber-physical system architecture is proposed, consisting of a low-level control loop implemented on a microcontroller, a high-level processing unit based on a single-board computer, and a cloud-based computational subsystem. This architecture ensures continuous acquisition and processing of multi-sensor data and provides adaptive system behavior under uncertainty, similar to intelligent measurement systems described in Fig. 1. The stability of the UAV air segment is evaluated using a composite metric that integrates both physical and computational parameters:

$$S = f(\sigma_\omega, \sigma_{IMU}, \Delta t_{control}, E_{recon}), \quad (1)$$

where $\sigma_\omega$is the variance of propeller angular velocity, $\sigma_{IMU}$represents inertial measurement variability, $\Delta t_{control}$denotes control loop delay, and $E_{recon}$is the neural network reconstruction error. This formulation allows real-time assessment of system stability under dynamic conditions.

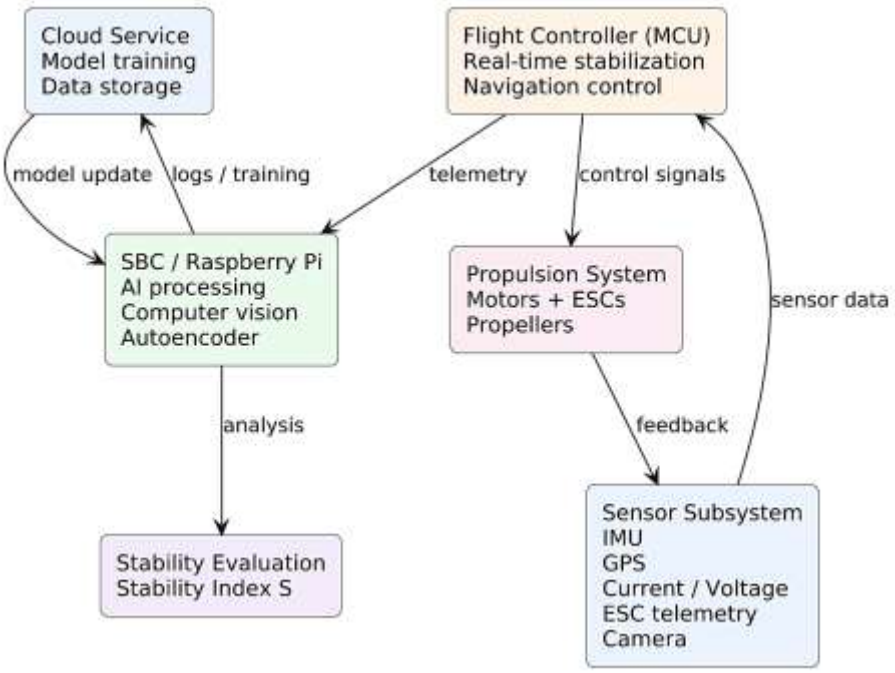



Fig. 1. Simplified architecture of the UAV air segment stability monitoring system with multi-sensor data processing and neural network-based stability evaluation

The dynamic behavior of the UAV can be approximated by a simplified model:

$$J\frac{d\omega}{dt} = T - D(\omega) - T_{dist}, \quad (2)$$

where $J$is the moment of inertia, $T$is thrust, $D(\omega)$is aerodynamic drag, and $T_{dist}$represents external disturbances such as wind.

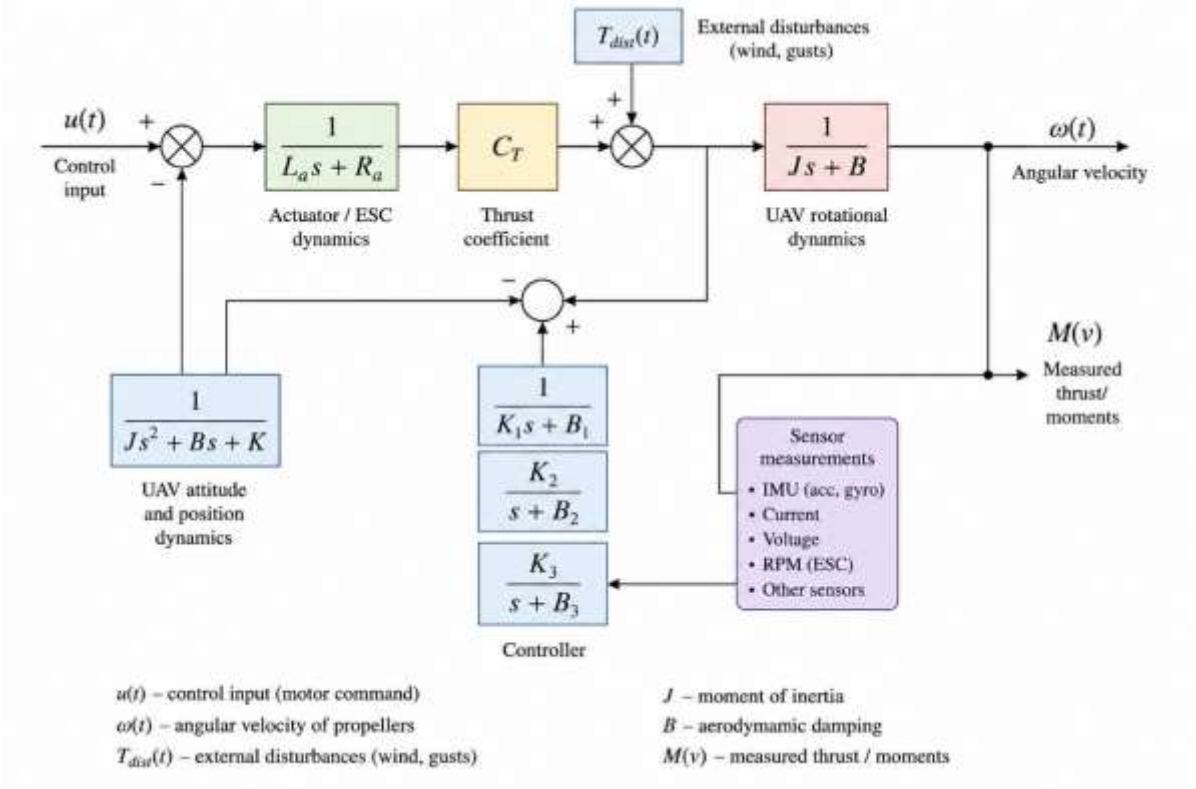



Fig. 2. Autoencoder-based anomaly detection scheme

To detect instability and abnormal system behavior, an Autoencoder neural network is used. The encoder compresses input data into a latent representation, while the decoder reconstructs the original signal. The model is trained by minimizing the reconstruction error:

$$L = \frac{1}{n}\sum(x_i - \hat{x}_i)^2. \quad (3)$$

A significant increase in reconstruction error indicates abnormal operating conditions, such as excessive vibration, control loop delay, or sensor inconsistency.

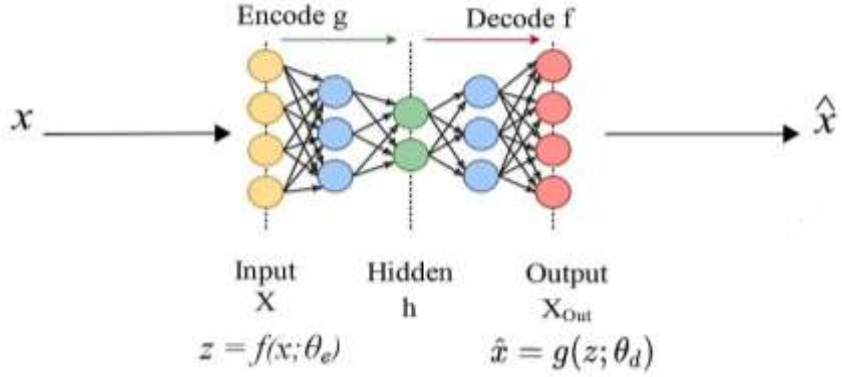



Fig. 3. Autoencoder-based anomaly detection scheme

**Conclusion**. A method for assessing the stability of the UAV air segment based on multi-sensor data fusion and Autoencoder neural networks has been proposed. The developed approach combines low-level real-time flight control with high-level intelligent processing and cloud-based model updating within a distributed cyber-physical architecture. The proposed stability criterion integrates propulsion dynamics, inertial measurements, control loop latency, and neural network reconstruction error into a unified framework for real-time stability evaluation. In contrast to traditional approaches focused only on physical parameters, the developed method additionally considers computational and communication factors affecting UAV operation under uncertainty. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach for detecting abnormal operating conditions caused by external disturbances, sensor inconsistencies, and control delays. The use of an Autoencoder-based model improves the robustness of anomaly detection and enables adaptive assessment of UAV stability in dynamic environments. The proposed architecture and mathematical model can be applied in autonomous UAV systems, multi-sensor robotic platforms, and safety-critical aerial monitoring applications operating under uncertain conditions.

## References


1. Mahony, R., Kumar, V., Corke, P.: Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor. IEEE Robotics & Automation Magazine 19(3), 20–32 (2012). https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2206474
2. Bouabdallah, S., Murrieri, P., Siegwart, R.: Design and control of an indoor micro quadrotor. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4393–4398. IEEE (2004). https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302409
3. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., Xu, L.: Edge computing: Vision and challenges. IEEE Internet of Things Journal 3(5), 637–646 (2016). https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198
4. Vázquez-Gutiérrez, Y., O'Sullivan, D.L., Kavanagh, R.C.: Small-signal modeling of the incremental optical encoder for motor control. IEEE Transactions on Industrial Electronics 67(5), 3452–3461 (2020). https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2912765
5. Xu, F., Dhimole, V.K., Cho, C.: Torque measurement technology by using a magnetostrictive ring and multiple magnets. Actuators 10(6), 124 (2021). https://doi.org/10.3390/act10060124
6. An, J., Cho, S.: Variational autoencoder based anomaly detection using reconstruction probability. Special Lecture on IE 2(1), 1–18 (2015). https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.00534
7. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.: Deep Learning. MIT Press, Cambridge (2016). https://www.deeplearningbook.org/
8. PX4 Development Team: PX4 System Architecture. PX4 User Guide (2026). https://docs.px4.io/main/en/concept/px4_systems_architecture
9. PX4 Development Team: PX4 Architectural Overview. PX4 User Guide (2026). https://docs.px4.io/main/en/concept/architecture

# METHODOLOGY FOR AUTOMATED VERIFICATION OF LED INDICATOR SIGNALS

**Hevlich T., Kuzmenko I., Starenkyi A.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Based on the analysis of existing approaches to automated verification of LED indication signals under dynamic conditions, a methodology for objective assessment of light pattern quality has been developed. The proposed approach is based on processing photodetector signals represented as structured time series. It has been determined that reliable defect detection requires the combined use of time-domain and frequency-domain analysis. To achieve this, an integrated metric is introduced, incorporating Mean Absolute Error (MAE), the Pearson correlation coefficient, and spectral analysis using the Fast Fourier Transform (FFT). The results show that detection accuracy depends on sampling parameters, signal alignment quality, and the sensitivity of the selected metrics. Overall, the proposed method enables automated verification of LED indication signals with a defined final evaluation and supports the detection of both amplitude distortions and high-frequency anomalies in dynamic operating conditions.

**Keywords**: LED indication signals, time series, Mean Absolute Error (MAE), Pearson correlation coefficient, Spectral analysis, Fast Fourier Transform (FFT), automated methodology.

**Introduction**. In automated verification of LED indication signals, a gap exists between the increasing complexity of dynamic lighting interfaces and the limited capabilities of conventional inspection methods. Manual visual testing cannot capture high-frequency anomalies, such as instability in indicator behavior or microsecond-scale delays [1-5]. At the same time, the use of commercial machine vision systems is not economically viable [6-9]. Therefore, there is a need to automate the analysis of LED indication signals using objective mathematical approaches that ensure high speed, accuracy, and reproducibility while remaining cost-effective and easy to implement.

**The purpose of the work** to develop and validate a methodology for automating the testing process of dynamic patterns in LED indicator components.

**Formulation of the problem**. Based on the requirements analysis and existing approaches, the problem is to design and implement a methodology that enables automated generation of statistical reference models and verification of LED indicator signals.

**Solving the problem**. The proposed mathematical approach for analyzing photodetector signals combines the objectivity of instrumental measurement with low implementation costs.

Representing the input data as a structured time series enabled a more precise formulation of the requirements for the analytical method, including the use of correlation analysis to assess signal shape and the Fast Fourier Transform for identifying frequency-related defects [10-15].

The final quality score in this methodology is computed as the arithmetic mean of three metrics, ensuring balanced sensitivity to different types of signal anomalies:

$$A_{total} = \frac{A_{MAE} + A_{Corr} + A_{FFT}}{3}. \quad (1)$$

The first component of the evaluation, as defined in formula (1), is a time-domain analysis based on the Mean Absolute Error (MAE) metric. It quantifies the average deviation between the brightness of the tested LED indicator and the reference signal. While MAE is sensitive to large amplitude variations, it may not capture waveform distortions if the overall accumulated error remains low.

The second component assesses signal shape consistency, such as periodic blinking patterns, using the Pearson correlation coefficient.

The third component is spectral analysis. High-frequency flickering or incorrect signal frequencies are difficult to identify in the time domain due to noise interference. Therefore, the

signal is converted into the frequency domain using the Discrete Fourier Transform (DFT) for more reliable defect detection.

Fig. 1 presents the overall workflow of the proposed methodology, illustrating the procedure for signal comparison.

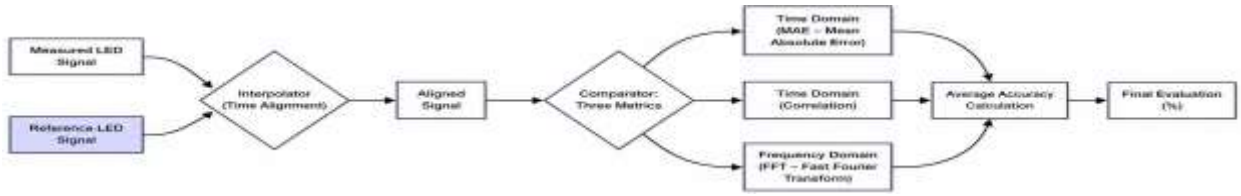



Fig. 1. Multifactor signal comparison methodology

Figure 1 shows the workflow in which the measured LED indication signal is first aligned and then comprehensively compared with a reference signal to produce a final quantitative assessment.

The experimental setup was implemented as a hardware-software system based on a “black box” approach, which ensures full isolation of the tested object from external optical disturbances.

To validate the system, a critical fault scenario was simulated in which the device generated a turn-on pattern instead of the expected turn-off pattern. The final evaluation indicated a decrease in accuracy to 52%, compared to the typical range of 97–99%, as shown in Figure 2.

In the upper plot, the reference signal (solid blue line) illustrates a gradual decay in amplitude from its maximum value to zero. In contrast, the measured signal (orange dashed line) exhibits a rising brightness trend, which is characteristic of LED activation. The corresponding frequency-domain analysis of this mismatch is presented in the lower section of Figure 2.

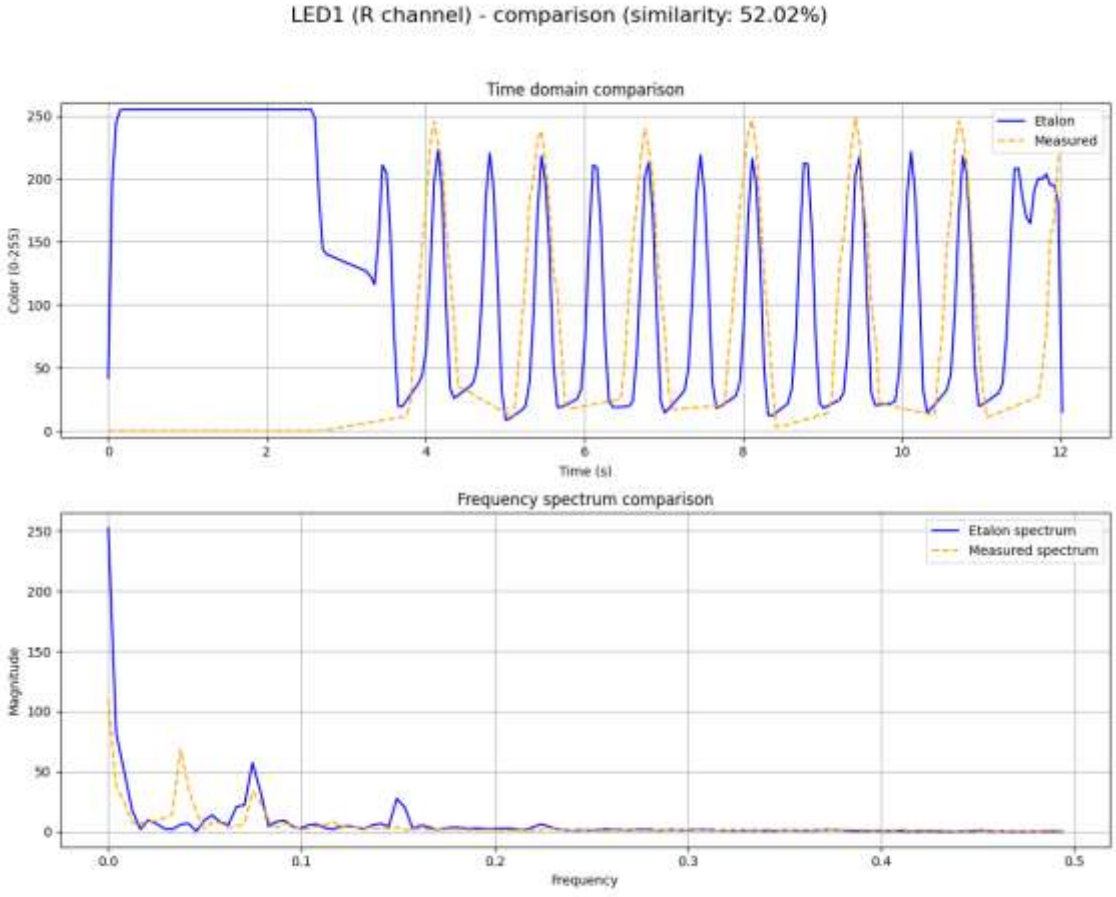



Fig. 2. Comparison of the LED indication reference turn-off pattern (blue) and the defective turn-on pattern measurement (orange), based on R-channel values from the RGB model

Although both signals are periodic, they differ in their phase alignment and spectral properties. The obtained final evaluation of 52%, which is significantly below the decision threshold of 97–99%, indicates a defect in the device, resulting in automatic rejection.

The application of the Fast Fourier Transform (FFT) is essential for detecting flickering-related defects. For instance, for a signal with $N = 1024$ samples, FFT provides an approximately 100× speed improvement compared to direct DFT computation (around 10,240 operations versus approximately 1,048,576), enabling real-time spectral analysis.

**Conclusion**. Comprehensive experimental results demonstrate that the proposed methodology achieves reliable identification of valid signal patterns with a final evaluation 97%, while ensuring consistent detection of defective products without errors. The differences between patterns correspond to a final evaluation that indicates robust automated methodology.

Its implementation enables a transition from a basic "pass/fail" evaluation to a more detailed quality parameter analysis. In addition, the proposed photodetector-based approach surpasses machine vision systems (such as Keyence and Cognex) in detecting high-frequency defects, while also offering a lower.

## References


1. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016. 172 p.
2. Psarommatis F., May G., Dreyfus P.-A., Kiritsis D. Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research. International Journal of Production Research. 2020. Vol. 58, No. 1. P. 1–17.
3. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. Computers in Industry. 2018. Vol. 101. P. 1–12.
4. McCamy C. S. A physical theory of the critical flicker frequency. Human Factors. 2014. Vol. 56, No. 7. P. 1290–1295.
5. Zhang Z. Camera calibration: a personal retrospective. Machine Vision and Applications. 2004. Vol. 15, No. 3. P. 202–207.
6. Pande P. S., Holpp L. What is Six Sigma? New York: McGraw-Hill, 2002. 96 p.
7. Vermesan O., Friess P. Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems. Aalborg: River Publishers, 2013. 348 p.
8. Lee S., Park J. LED Driver Circuit Design and Analysis. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2015. Vol. 62, No. 9. P. 5430–5438.
9. Malacara D. Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2011. 182 p.
10. Shannon C. E. Communication in the presence of noise. Proceedings of the IRE. 1949. Vol. 37, No. 1. P. 10–21.
11. Axelson J. Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems. 2nd ed. Madison: Lakeview Research, 2007. 380 p.
12. Kuzmenko I. M., Datsiuk O.A. Basic Algorithms and Data Structures. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022.
13. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. 3rd ed. Boston: Pearson, 2006. 535 p.
14. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. 1120 p.
15. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. San Diego: California Technical Publishing, 1997. 626 p.

# SPECIALIZED SOFTWARE Q+ AS A TOOL FOR THE OPTIMIZATION OF WATER TREATMENT SYSTEM: A CASE STUDY

**Huliienko S.V., Barbash V.A., Halysh V.V., Trus I.M., Ivanenko O.I.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The application of the specialized software Q+ for the simulation of the reverse osmosis systems was considered on the example of the modernization of the existing plant for the technological water treatment, which did not provide the proper quality of separation. As a result of the simulation, the reasons for the insufficient effectiveness of the performance of the plant were defined, and the directions of modernization were proposed. The recommendations for increasing the effectiveness of the membrane separation were formulated. They included the replacement of the membrane modules, the increase in the number of pressurized vessels, and the dosing of sodium hydroxide in the permeate stream. The results of the simulation showed that the program product Q+ is a convenient tool for the modernization and optimization of the performance of the membrane plants, which allows for choosing the most rational configuration of the plant and its performance mode with moderate time and computing power costs.

**Keywords**: Reverse osmosis, membrane, simulation, software, simulator

**Introduction**. The water is the key technological resource for many enterprises in chemical technology and related branches, which in many cases require a suitable level of water treatment, and it is an important factor in ensuring the quality of finished products [1]. During the recent decade, the membrane processes, first of all the reverse osmosis, have taken the leading place among the water treatment technologies. These processes are characterized by the universality, high effectiveness of separation, and the moderate level of power consumption. To provide the effectiveness and reliability of performance of such systems, it is necessary to ensure the optimal configuration of the process according to the specific industrial demands [2]. In the design process of the reverse osmosis systems, the methods of mathematical simulation are widely used; however, there are several approaches to the simulation of this process, which are described in detail in review works [3-5]. Since some of the existing mathematical models are quite complex and require significant amounts of time for the calculations, the effective optimization of such systems is not possible without the application of special software. The membrane manufacturers proposed several program products for such purposes, for example, ROSA [6], IMS Designer [7], Q+ [8], etc. The review of the application of such software is provided in work [9]. These programs can be effectively used both for the design of new reverse osmosis systems and the modernization of existing ones.

**The purpose of the work** is to modernize the existing reverse osmosis plant for technological water treatment at the chemical plant and to optimize its performance.

**The scientific novelty of the work** consists in the comparative simulation-based justification of the modernization strategy for an operating reverse osmosis plant using Q+ software according to the requirements for permeate quality and process stability.

**Materials and methods**. In the current work, the operating reverse osmosis plant with the rated capacity by raw water of 150-400 $m^3$/h and rated capacity by permeate of 100-250 $m^3$/h is considered. The water from the Southern Bug River, with the pretreatment, is used as raw material. The pretreatment stage includes the coagulation and filtration processes. The membrane plant includes two sections: the first one contains 8 pressurized vessels, and the second one incorporates 4 of the same pressurized vessels. Each pressurized vessel includes 6 membrane modules LG BW 440 ES.

**Formulation of the problem.** The reverse osmosis system at the plant does not meet the requirements for technological water treatment to achieve the required quality of the finished products. At that, according to manufacturing data, the quality of the finished products is decreased with an increase in the Calcium ions content and, to a lesser extent, with increasing the concentration of Sulphates and Chlorides. Also, for the efficiency of the technological process, it is necessary to maintain the pH of the technological water at a level of 6.8-7.2. The modernized plant should ensure the required permeate quality.

The simulation and analysis of the system performance were carried out using the specialized software Q+.

In the course of the study, the selection of the type of membrane module was carried out, and the different modes of the plant operation were analyzed. In particular, for the finding of the means of providing the proper level of permeate pH, the systems with different levels of permeate recovery, the systems with additional sections, the systems with concentrate recirculation, and the systems with pH regulation by dosing of sodium hydroxide were simulated.

**Results and discussion.** The first step in the simulation consisted of the selection of a suitable type of membrane module. The membrane system was simulated with all available types of membrane modules. The results of simulations show that for all types of modules, the pH value of permeate was in the range from 5.38 to 5.86, which does not correspond to the needed level of solution neutrality. Moreover, the simulation results for all module types showed a warning that the operating mode does not meet the recommended parameters, with corresponding risks. Therefore, none of the considered modules satisfies the working conditions.

In such conditions, the minimal content of Calcium, Sulphates, and Chlorides in permeate was chosen as the criterion of optimality. For all of the mentioned ions, the minimal values of concentration were achieved for the membrane module LG BW 400 R G2 (Table 1). It is reasonable to apply this type of module for the optimization of the reverse osmosis plant performance.

Table 1

**The content of main ions in permeate according to the simulation results, mg/l**

| Module type | $Na^+$ | $K^+$ | $Mg^{2+}$ | $Ca^{2+}$ | $Cl^-$ | $SO_4^{2+}$ | $HCO_3^+$ | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| LG BW 400 AFR G2 | 0,33 | 0,11 | 0,05 | 0,12 | 0,1 | 0,04 | 1,44 | 5,51 |
| LG BW 400 AFR | 0,4 | 0,14 | 0,06 | 0,15 | 0,12 | 0,05 | 1,79 | 5,6 |
| LG BW 400 ES L | 0,42 | 0,14 | 0,06 | 0,16 | 0,13 | 0,06 | 1,85 | 5,62 |
| LG BW 400 ES | 0,43 | 0,15 | 0,07 | 0,17 | 0,13 | 0,06 | 1,93 | 5,64 |
| LG BW 400 R G2 | 0,23 | 0,08 | 0,03 | 0,09 | 0,07 | 0,03 | 1,05 | 5,38 |
| LG BW 440 ES L | 0,47 | 0,16 | 0,08 | 0,18 | 0,14 | 0,06 | 2,09 | 5,67 |
| LG BW 440 ES | 0,5 | 0,17 | 0,07 | 0,19 | 0,15 | 0,06 | 2,21 | 5,69 |
| LG BW 440 R G2 | 0,26 | 0,09 | 0,04 | 0,11 | 0,08 | 0,03 | 1,22 | 5,44 |
| LG BW 400 R Dura | 0,31 | 0,11 | 0,05 | 0,12 | 0,09 | 0,04 | 1,37 | 5,49 |
| LG BW 400 R | 0,4 | 0,14 | 0,06 | 0,15 | 0,12 | 0,05 | 1,79 | 5,6 |
| LG BW 440 R Dura | 0,36 | 0,13 | 0,05 | 0,14 | 0,11 | 0,05 | 1,6 | 5,56 |
| LG BW 440 R | 0,46 | 0,16 | 0,07 | 0,18 | 0,14 | 0,06 | 2,03 | 5,66 |

The mentioned above warnings in the simulation results are related to the discrepancy between the productivity of the plant and the geometrical dimensions of modules. To provide the required flow rate, it is necessary to increase the number of pressurized vessels in sections. Simulation results indicate that increasing the number of pressurized vessels up to 12 in the first section and up to 5 in the second one allows overcoming the mentioned warnings about membrane performance. These changes in the plant configuration allow for optimizing the hydrodynamical conditions and ensuring the stable operation of the plant.

With the aim to increase the values of pH in permeate, the simulations for the various values of the permeate recovery (part of the feed solution, which passes into permeate) were carried out, and the results indicate that increasing this parameter from 66.67% to 80% allows to increase pH in permeate from 5.55 to 5.61, which is negligibly low. Therefore, this method cannot be considered effective.

Also, the simulations of the systems with the introduction of additional sections into the plant were carried out. For example, increasing the number of concentrate treatment stages to three yields a permeate with a pH of 6.06, and when four stages are used, the pH rises to 6.47 if the permeate is collected separately from the last stage. This approach allows for a significant increase in the pH index; however, it is still lower than the required level. Moreover, in this case, the collection of permeate from the last section is needed. The flow rate of permeate in the last section is lower, and it has lower quality. Therefore, this variant is also not effective enough.

In the current work, the simulations of the operation mode with recirculation of part of the concentrate were carried out. The result showed that for the recirculation of 25-35% of concentrate, the changes in the pH value are minimal, and for the increase of the part of recirculated concentrate, it increases slightly (up to pH = 6.14 for 75%) with a simultaneous dramatic increase of the ions concentration in permeate. In particular, the concentration of the Calcium ions increases from 0.13 mg/l to 0.55 mg/l. Such a decline in quality demonstrates that this mode of plant operation is not effective.

The simulation results for the system using different membrane modules across the different treatment stages showed that this plant configuration variant cannot achieve the required technological water pH.

Among the variants that can provide the required pH level is the method of pH regulation of the feed water by dosing sodium hydroxide. The simulation result demonstrated that increasing the pH of feed water up to 9.0 allows for obtaining the permeate with pH = 6.85, which corresponds to the required level for the technological process. This indicates the effectiveness of this method. At that, the amount of added sodium hydroxide is 15.21 mg/l.

Also, it is possible to simulate the regulation of pH by using the phantom additional pass of treatment. In this case, the dosing of 3.55 mg/l of sodium hydroxide is required to obtain of the pH of purified water at the level 7.0. These results show that this method is the most effective among the considered variants for providing the required pH level.

**Conclusion.** The results of the simulation of the operation of the reverse osmosis plant have shown that the program product Q+ is a convenient tool for modernization and optimization of the membrane plants performance, which allows for defining the most rational plant configuration and its operation mode with moderate requirements in time and computation power. For the considered example, the results of simulations allow us to propose recommendations for the modernization, which consist in replacement the membrane modules LG BW 440 ES with the modules LG BW 400 R G2, increasing the pressurized vessels up to 12 in the first section, and up to 5 in the second one, and also dosing of 3.55 mg/l of sodium hydroxide in permeate.

## References


1. Towler, G., Sinnott, R. Chemical Engineering Design. Butterworth-Heinemann. Oxford (2021).
2. Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N.N., Darwish, N. A., Hilal, N.: Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. Desalination 459, 59-104 (2019). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008.
3. Ahmed, F. E., Hashaikeh, R., Diabat, A., Hilal N.: Mathematical and optimization modelling in desalination: State-of-the-art and future direction. Desalination 469, 114092 (2019). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114092.
4. Karabelas, A.J., Kostoglou, M., Koutsou, C.P.: Modeling of spiral wound membrane desalination modules and plants – review and research priorities. Desalination 356, 165-186, (2015). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.002.
5. Huliienko, S. V., Korniyenko, Y.M., Muzyka, S. M., Holubka, K.: Simulation of reverse osmosis process: novel approaches and development trends. Journal of Engineering Sciences 9(2), F6–F36 (2022). DOI: https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).f2.
6. Delgado-Torres, A. M., García-Rodríguez, L., Del Moral, M. J.: Preliminary assessment of innovative seawater reverse osmosis (SWRO) desalination powered by a hybrid solar photovoltaic (PV) - Tidal range energy system. Desalination 477, 114247 (2019). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114247.
7. Karabelas, A., Mitrouli, S., Kostoglou, M.: Scaling in reverse osmosis desalination plants: A perspective focusing on development of comprehensive simulation tools. Desalination 474, 114193 (2019). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114193.
8. Kim, G., Park, K., Soo, A., Shon, H. K., Woo, Y. C.: Machine learning-driven process design and performance prediction for small-scale seawater reverse osmosis desalination. Desalination 620, 119686 (2025). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119686.
9. Jeon, J., Kim, D., Kim, N., Kim, S.: Applicability and limitation of the industrial reverse osmosis system simulators. Desalination 549, 116358 (2023). DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116358

# COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROLLER MODELS USED AT LOW LEVELS OF AI-SUPPORTED AUTONOMOUS ROBOT SYSTEM

**Kargin A.[1,2], Petrenko T.[1], Piatykop O.[2], Pronina O.[2]**
[1]Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
[2]Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

**Abstract**. The development of Artificial Intelligence (AI) that supports Autonomous Robotic Systems (ARS) is a pressing problem today. Feeling AI (FAI), a hybrid AI for small ARS applications based on cognitive models borrowed from living beings, is discussed. At low levels of ARS, many different types of controllers are used. The purpose of this paper is to explore the capabilities of different models for these controllers, which, together with FAI possibilities, demonstrate high performance. Based on the laboratory apparatus, the experimental results for traditional proportional–integral–derivative (PID), an artificial neural network, a fuzzy logic system, adaptive controller models, and a variable-structure controller based on the principles of an animal's eye have been presented.

**Keywords**: Feeling Artificial Intelligence, Autonomous Robotic Systems, Hybrid AI, Fuzzy Logic System, Artificial Neural Network, Controller, Variable Structure Controller.

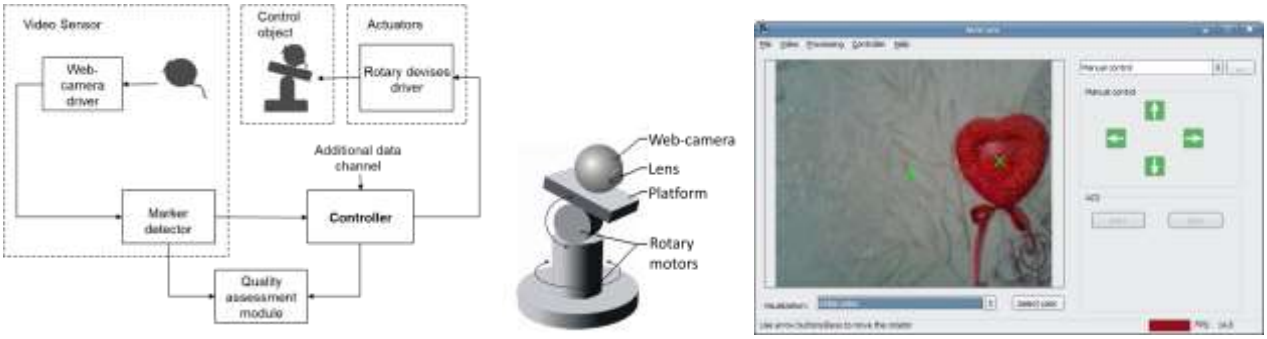
**Introduction**. One of the major domains of AI applications is related to autonomous systems [1]. Creating AI for ARS that satisfies a certain level of autonomy and operates not in a virtual Internet but in the real, physical world is a pressing task today. The current state and trends in AI (Spatial computing, Polyfunctional robots) are well-suited to automating services in the virtual world of the Internet [2]. To address a similar problem in the physical world, the RT-X project has been proposed to create a General Robotic Brain with GenAI support [3]. Such an AI, equipped with a symbolic decision-making mechanism and a pre-trained set of skills for the physical world, is one type of hybrid AI designed for large-scale robotic applications [4]. Another hybrid AI model, known as FAI, based on cognitive models borrowed from living beings, is proposed [5-8] for small ARS applications that utilize conventional computer hardware and software. The mobile ARSs handle many tasks related to movement control, such as azimuthal motion, motion along fences or lines, obstacle avoidance, off-road driving, and tracking the movement of external objects using video and other sensors mounted on a rotating platform. These tasks belong to the lower levels of the hybrid AI structure and are implemented as a feedback controller that receives data from sensors and a set point from FAI's high-levels. To implement a controller, there is a rich choice of models, such as a traditional proportional–integral–derivative (PID), an artificial neural network, a fuzzy logic system, an adaptive, and a self-learning. Justification for choosing a controller's model that is consistent with high-level FAI models is now an actual issue.

**The purpose of this work** is to explore the capabilities of different models for use as low-level controllers in mobile ARSs that are supported by a hybrid FAI. Based on the experiments conducted, the results are to be compared.

**Formulation of the problem**. ARSs operate in an environment characterized by uncertainty and variability, noisy data, and decisions are made in conditions of incomplete knowledge. Most of these ARS's autonomy violations are addressed by the FAI's decision-making components [5, 7]. Nevertheless, lower-level controllers face uncertainty that significantly impacts their autonomy level [5]. In such situations, the intelligent hybrid controllers, using data from the upper intelligence level about the disturbance and feedback to more precisely manage it, help overcome this uncertainty.

**Solving the problem**. To study the capabilities of different controllers based on experimental data, the hardware complex has been assembled and supplemented with the required software (Fig. 1). As a universal control object, an electromechanical system (Fig. 1.b) was used. It consists of a rotating platform with two degrees of freedom, a webcam rigidly mounted on the platform, and a computer connected via a COM port. Software, deployed on a personal computer, includes the drivers, video marker detector, quality criteria processor, and the controller programs (Fig. 1a). Visual information is received in real time at a specific frequency from a webcam and represents a

digital color image of the spatial region within the frame. The video frame contains a background and a target. A saturated red object is selected as the target marker (Fig. 1.c). The marker detector software computes the coordinates of the target marker's image center of mass, shown by a green cross in Fig. 1c, in the frame coordinate system. The controller may perform either the stabilization (target marker doesn't move) or tracking (target marker moves along a random trajectory) task. In Fig. 1a, the block “Controller” actually comprises two independent controllers: one for motions in the horizontal plane and the other for motions in the vertical plane. Components of a complex have been chosen with low accuracy to investigate the impact of various types of disturbances on the quality of control. Sensor interference includes image noise and scan distortion when the camera rotates. Actuator interference is due to the low manufacturing precision of the rotary mechanism, the lack of position sensors (rotation angles), and its sensitivity to physical loads on the platform (the camera's weight). Furthermore, some components experience a significant time lag, for example, the rotary mechanism itself.




a) b) c)

Fig. 1. Structure and some components of the research complex

Most of the approaches and models used to design the feedback and hybrid controllers have been investigated. The structure and parameters of the models under study have been thoroughly experimentally adjusted: for each set of parameters a series of experiments has been conducted in which the relative positions of the target marker and characteristics of its motion are varied, as well as the values of most violations such as delays in the video system and actuator, degrees of image noise, and the battery charge of the rotary device. To assess core performance criteria such as rise time, maximum overshoot, settling time, peak time, and delay time, the transient response control, as a function of error over time, has been calculated. Below is a brief overview of the investigated model.

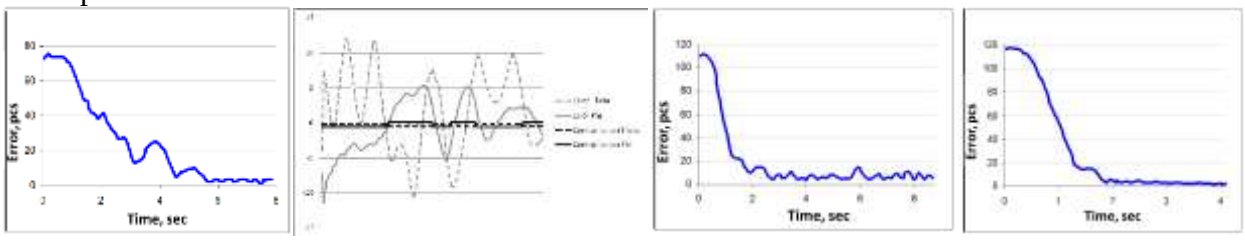
**Conclusion**. Traditional PID controllers, after experimental adjustment using the Ziegler-Nichols tuning method, are effective across the entire range of marker initial disposition when there are no disturbances (Fig. 2a). They are effective at frame rates ($fps \geq 5$), but cannot be used with delays of action device (delay > 0.1c).

The neuro-controller has been implemented as a multilayer perceptron with a sampling period determined by the video sensor's frame frequency. The neural network has three inputs: the current time error and errors at two previous times, and two outputs: control signals for the two rotator motors. The number of inner layers and the quantity of neurons in each layer were varied. The parallel supervisory learning method is used for training a neural network. The training set is prepared in a combined mode: first, in manual mode, the target marker is placed at one of the prepared positions; then, the PID controller is launched, and training data were collected in operational mode. These data not only allow computation of the error function but also show the control signal over time, as shown in Fig. 2b. The neuro-controller shows stability, but it does not achieve the necessary accuracy due to random disturbances that cannot be predicted at the initial stage of learning.

Several models of fuzzy controllers have been studied. The first one is a fuzzy analog of a PID controller: there are three input linguistic variables, Deviation, First-order difference of deviation, and Smoothed integral deviation, and two output variables with six terms. Twenty-four

fuzzy rules are used by the Mamdani fuzzy inference engine as well as the Takagi-Sugeno model. The second representative is an adaptive fuzzy controller that compensates for interference and accounts for the situation by adjusting PID controller parameters. Based on fuzzy expert knowledge, the FLS adjusts the control law and its parameters. An example of a verbal rule is the following: “For a large distance to the target marker, the proportional component of PID control laws should be predominant”. In the Mamdani-type fuzzy controller, the motion trajectory is not smooth, indicating a large number of erroneous control decisions (Fig. 2c). The adaptive fuzzy controller ensures high control quality even with high sensor latency. The Takagi-Sugeno model provides more accuracy, ranging from 2 pixels at 20 fps to 6-7 pixels at 5 fps. The transient response time is shorter than in the previous case, and the motion trajectory is smoother (Fig. 2d).

The variable structure controller has shown the best performance. The above-described controllers provide control for limited violations. However, long delays can cause the target marker to move out of the camera's field of view. In such cases, the above controllers are unable to perform the control task because information about the marker's actual position is unavailable. The variable structure controller is founded on the principles of an animal's eye, which is implemented by following strategies: 1) scanning space around itself when there is no movement in the field of view using regular and random search; 2) searching for a "lost" object in the field of view; 3) tracking a moving object that is selected and present in the camera's field of view; 4) switching from one moving object to another within the camera's field of view. These strategies are implemented as a set of independent controllers, parts of which are neuro-controller, but most of them are fuzzy controllers. The FAI components identify the situations where one or another controller is suitable and push them. So, the approach of a variable-structure controller is suitable for a hybrid structure, as components of FAI can interact with controllers at low levels of ARS.




a) b) c) d)

Fig. 2. Results of some experiments

## References


1. Autonomy & Uncrewed Systems. The Future of Autonomy is Human-Centered. Lockheed Martin. https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html (accessed Aprl. 15, 2026).
2. Gartner: 2025 Top Strategic Technology Trends URL: https://www.gartner.com/en/articles/top-technology-trends-2025.
3. Levine S., Hausman K. The global project to make a general robotic brain // IEEE Spectrum. – Jan 2024. URL: https://spectrum.ieee.org/global-robotic-brain.
4. Open X-Embodiment: Robotic Learning Datasets and RT-X Models. URL: https://robotics-transformer-x.github.io/.
5. Kargin A., Petrenko T. Knowledge Distillation for Autonomous Intelligent Unmanned Systems // In: Pedrycz W., Chen S.-M. (eds.) Advancements in Knowledge Distillation: Towards New Horizons of Intelligent Systems. – Studies in Computational Intelligence, vol. 1100. – Springer, 2023. – P. 193–230.
6. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems // Proc. Global Conf. on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT). – IEEE, Alamein New City, Egypt, 2022. – P. 88–93.
7. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence. Cognitive Decision-making Model Borrowed from Living Beings // International Symposium on Networks, Computers and Communications. – IEEE, Washington DC, USA, 2024. – P. 1–6.
8. Kargin A., Petrenko T. Event-Driven Architecture of Feeling Artificial Intelligence Supported by Data Aging Model // In: Mejdoub Y., Elamri A., Kardouchi M. (eds.) Connected Objects, Artificial Intelligence, Telecommunications and Electronics Engineering (COCIA 2025). – Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1584. – Springer, Cham, 2025. – P. 178–183. DOI: 10.1007/978-3-032-01536-5_27

# DESIGNING OPTIMIZED COMPUTER DEVICE CORES BASED ON LIBRARY ELEMENT SUBSTITUTION TECHNIQUE AND MODIFIED GENETIC ALGORITHM

**Kolodchak O.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses automated design of optimized computer device cores using a library element substitution technique combined with a modified genetic algorithm (MGA). The proposed methodology employs a hierarchical library of parameterized VHDL/IP modules described by formalized XML metadata (performance, power, area, compatibility), and applies genetic crossover and mutation exclusively to individuals that fail a selection threshold, preserving high-quality solutions from degradation. The methodology was validated on four hardware cores – a 32-bit ALU, a 16-bit adder, a UART controller, and a BRAM 512×32 block – implemented on a Xilinx Spartan-7 XC7S50 FPGA. Results demonstrate LUT+FF reductions of 10-13%, power savings of 10-17%, critical path delay reductions of 10-20%, frequency gains of 7-20%, and design time savings of 65-70% compared to manual design. MGA convergence analysis over 15 generations confirms stable, monotonic fitness improvement and a 3× reduction in synthesis calls versus classical GA.

**Keywords:** computer device core; library-based design; VHDL; IP blocks; modified genetic algorithm; design space exploration; FPGA; SoC; optimization; automated design.

**Introduction.** The growing complexity of System-on-Chip (SoC) architectures and widespread adoption of FPGA platforms place mounting demands on hardware design automation. Traditional iterative methods for computer device core design are becoming prohibitively labor-intensive, motivating intelligent, library-driven optimization approaches. Existing EDA tools (Xilinx Vivado, Cadence Cerebrus) optimize at synthesis and physical levels but lack full automation of structural, multi-criteria architectural design combined with library-based component selection [1, 2].

**The purpose of the work.** To develop and experimentally validate a methodology for automated multi-criteria optimization of computer device cores, based on the technique of substituting required library elements and a modified genetic algorithm, demonstrating improvements in hardware area, frequency, power, and design productivity.

**Formulation of the problem.** The core design challenge is selecting the optimal combination of pre-verified library components – each available in multiple parameterized variants – to satisfy simultaneous constraints on operating frequency, LUT area, and power consumption, while minimizing design time. This constitutes a multi-criteria combinatorial optimization problem over a large discrete design space, where classical exhaustive search is computationally infeasible and existing heuristics either lack formalized library integration or apply genetic operators indiscriminately, wasting resources on already-optimal individuals.

**Solving the problem.**

The proposed methodology consists of three integrated components: a formalized component library, a genome-based substitution mechanism, and a modified genetic algorithm (MGA).

The component library is organized as a hierarchical collection of VHDL/IP modules, each represented by a VHDL entity-architecture pair and an XML metadata descriptor containing element ID, port interfaces, performance characteristics (latency, Fmax, LUT/FF), compatibility rules, and functional category (ALU, control, memory, I/O). Each functional slot in the design may be filled by one of several library variants – e.g., ALU_8bit, ALU_16bit, ALU_low_power – enabling targeted substitution [3].

Each candidate core is encoded as a genome – an ordered sequence of library module identifiers corresponding to functional blocks (e.g., [ALU_16bit, REG_A, MUX_2to1, CONTROL_1]). The substitution algorithm executes four steps:

1) port compatibility validation;

2) top-level VHDL compilation via component port-mapping;

3) fast metric aggregation from XML metadata;

4) full Vivado synthesis for top-K individuals per generation.

The MGA extends classical GA with a selective operator mechanism: crossover and mutation are applied only to individuals whose fitness falls below a defined acceptance threshold (0.75 in this study). High-fitness individuals are preserved unchanged (elitism). This mechanism eliminates redundant operations on optimal designs, accelerates population stabilization, and reduces the number of full synthesis calls from 300 (classical GA, 15 generations × 20 individuals) to 45 (MGA, top-*K*=3), a 3× computational cost reduction.

The multi-criteria fitness function (1) is:

$$Fitness(x) = wf * (F(x)/Fref) - wa * (A(x)/Aref) - wp * (P(x)/Pref), \quad (1)$$

where $F(x)$ – operating frequency (MHz), $A(x)$ – hardware area (LUT), $P(x)$ – power (mW); $Fref, Aref, Pref$ – library reference values; weights $wf = 0.5, wa = 0.3, wp = 0.2$ ($sum = 1.0$). Individuals violating hard constraints are prioritized for genetic operations [4, 5].

Experimental validation was performed on a Xilinx Spartan-7 XC7S50 FPGA (Vivado 2022.1) with a population of 20 individuals and 15 generations across four hardware cores: 32-bit ALU (combinational), 16-bit Adder (combinational), UART controller (sequential FSM), and BRAM 512×32 (memory). Table 1 summarizes the key results.

Table 1

**Optimization Results: Manual vs. MGA-Optimized (Xilinx Spartan-7)**

| Core | LUT Manual | LUT Optim. | Freq. Manual (MHz) | Freq. Optim. (MHz) | Power Manual (mW) | Power Optim. (mW) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ALU 32-bit | 320 | 280 | 200 | 220 | 300 | 250 |
| Adder 16-bit | 80 | 70 | 250 | 270 | 90 | 75 |
| UART | 50 | 45 | 100 | 120 | 60 | 50 |
| BRAM 512×32 | 0 | 0 | 150 | 160 | 200 | 180 |

LUT+FF resources were reduced by 10-13% for all logic cores (BRAM uses fixed BRAM36 tiles, unchanged). Operating frequency improved by 6.7-20%, with the largest gain in the UART controller (+20%) where selection of an FSM-optimized library variant (UART_TX_v2) reduced the critical path by 15%. Power savings of 10-17% were achieved through low-power variant selection and reduced switching activity. Design time decreased by 65-70% relative to manual design: the number of manual steps was reduced from 8-15 to 2-3 per core through automated library search, fast metadata-based evaluation, and automatic VHDL generation.

MGA convergence analysis showed that all four cores reached approximately 85% of their final fitness value by generation 8, with no fitness regression between generations – confirming the effectiveness of the selective operator mechanism. Compared to a standard EDA synthesis flow, the MGA methodology achieves 14% better area, 10% higher frequency, 16% lower power, and 70% faster time-to-design, with 100% functional test coverage versus 94-97% for manual designs.

**Conclusions.** The proposed methodology for automated design of optimized computer device cores, based on the library element substitution technique and modified genetic algorithm, provides consistent and significant improvements across all key hardware metrics. The MGA's selective operator mechanism reduces computational overhead by 3× while maintaining full optimization quality. Experimental validation on four core types confirms reductions of 10-13% in hardware area, 10-20% in critical path delay, 10-17% in power consumption, and 65-70% in design time. The

methodology outperforms both manual design and standard EDA tools across all evaluated criteria and provides a practical foundation for intelligent, scalable CAD systems for next-generation SoC and FPGA-based architectures.

## References


1. Patterson D. A., Hennessy J. L. Computer Organization and Design. – 5th ed. – Morgan Kaufmann, 2014.
2. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Addison-Wesley, 1989.
3. Saeedi S. et al. A Survey on Design Space Exploration Approaches for Approximate Computing Systems // Electronics. – 2024. – Vol. 13(22). – DOI: 10.3390/electronics13224442.
4. Pavlenko O. et al. Searching Extreme Paths Based on Travelling Salesman's Problem for Wireless Emerging Networking // LNEE. – Vol. 965. – Springer, 2023. – DOI: 10.1007/978-3-031-24963-1_16.
5. Kolodchak O. M. Designing Cyber-Physical Systems Using the Library Element Substitution Technique // Grail of Science. – 2024. – No. 46. – P. 618-622. – DOI: 10.36074/grail-of-science.29.11.2024.
6. Kolodchak O. M., Melnyk A. O. Modified Genetic Algorithm for Searching Optimal Solutions in Digital Structure Design // Bulletin of Lviv Polytechnic National University. – 2005. – No. 546. – P. 69-75.
7. Pamula P. et al. Verification of SoC Using Advanced Verification Methodology // MDPI Engineering Proceedings. – 2023. – DOI: 10.3390/engproc34010012.
8. Li Y. et al. Fine-grained Hardware Resource Optimization and Design Automation // ScienceDirect. – 2025. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110680.
9. Mazouz A., Nguyen V.-T. Genetic Algorithm Design Exploration for On-Device Training on FPGAs. – arXiv:2504.08534. – 2025.
10. Yu M., Huang S., Chen D. Chimera: A Hybrid Machine Learning Driven Multi-Objective Design Space Exploration Tool for FPGA High-Level Synthesis. – arXiv:2207.07917. – 2022.
11. Vivado Design Suite User Guide: High-Level Synthesis (UG902). – Xilinx, 2022.
12. Kolodchak O. M. Conceptual Model of a Methodology for Designing Optimized Computer Device Cores Based on the Technique of Substituting Required Library Elements // ITEST-2024 Proceedings. – 2024.
13. Siracusa M. et al. A Comprehensive Methodology to Optimize FPGA Designs via the Roofline Model. – eScholarship, 2021.
14. IEEE Std 1076-2019. VHDL Language Reference Manual. – IEEE, 2019. – DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8796489.

# MODELING AND MITIGATION OF TORSIONAL STICK-SLIP OSCILLATIONS IN HORIZONTAL WELL DRILLING ACCOUNTING FOR NON-NEWTONIAN DRILLING FLUID PROPERTIES AND BHA CONFIGURATION

**Koroviaka Ye., Dmytruk O., Akolzin I., Zaiets V.**
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** Torsional stick-slip oscillations cause accelerated PDC bit wear, downhole tool failures, and reduced ROP in extended-reach horizontal drilling. This study develops a multi-degree-of-freedom torsional dynamic model incorporating Herschel-Bulkley non-Newtonian fluid damping, distributed borehole friction, and nonlinear bit-rock interaction. The aim is to define criteria for suppressing stick-slip through optimization of surface RPM, WOB, and BHA configuration without downhole tools. Methods combine numerical integration of the distributed model, parametric analysis, and validation on field torque/ROP data from Western Ukraine carbonate wells. Results show that raising surface RPM from 60 to 140–150 rev/min reduces the stick-slip index (SSI) and eliminates full-stick phases near 145 rev/min, while lowering WOB from 140–160 kN to 60–80 kN suppresses stick-slip but decreases ROP by 20–35%. Adding 60–100 m HWDP worsens oscillations due to higher inertia; optimal drill collar length (18–36 m) minimizes high-frequency modes. The model achieves <7–9% torque prediction error in transients and supports real-time ROP maximization under torsional stability constraints.

**Keywords:** stick-slip vibration, torsional oscillation, PDC bit, non-Newtonian drilling fluid, Herschel-Bulkley model, horizontal drilling, BHA configuration, rate of penetration.

**Introduction.** In horizontal and extended-reach wells drilled in hard carbonate and tight clastic formations torsional stick-slip remains the dominant vibration mode leading to 15–40% ROP reduction, increased bit wear and frequent tool failures. Conventional soft-torque and constant-RPM control strategies often fail to suppress severe stick-slip under varying bit-rock friction and non-Newtonian fluid damping. High-resolution surface torque data combined with accurate dynamic modeling can provide the basis for proactive parameter adjustment without expensive downhole subs.

**Work goal.** To develop and validate a torsional stick-slip model incorporating realistic fluid rheology and BHA geometry, and to derive practical operational windows for surface RPM, WOB and BHA design that ensure torsional stability while preserving economically acceptable ROP.

**Problem statement.** The main difficulty consists in coupling distributed frictional torque along the horizontal section, nonlinear velocity-weakening bit-rock interaction and shear-rate-dependent damping of the drilling fluid within a computationally tractable yet sufficiently accurate model suitable for parametric studies and real-time advisory.

**Main part.** The primary challenge lies in coupling distributed frictional torque along the horizontal section, nonlinear velocity-weakening bit-rock interaction, and shear-rate-dependent damping of the drilling fluid within a computationally tractable yet sufficiently accurate model suitable for extensive parametric studies and real-time advisory applications.

The drill string is modeled as a distributed-parameter torsional system. The governing equation for angular displacement $\theta(z,t)$ is:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(GJ\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) - \rho I\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} = -T_f(z,t) - T_d(z,t), \quad (1)$$

where $GJ$ denotes torsional stiffness, $\rho I$ is the polar moment of inertia per unit length, $T_f(z,t)$ represents frictional torque from borehole contact (Coulomb plus velocity-weakening component), and $T_d(z,t)$ is dissipative torque from the Herschel-Bulkley fluid given by

$$T_d = k\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)^n + \tau_0 \cdot \text{sign}\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right). \quad (2)$$

At the bit-rock interface, the torque follows the nonlinear relation

$$T_b = \mu(\text{WOB}) \cdot \text{WOB} \cdot r_b \cdot \left[1-\gamma\left(\frac{\Omega_b}{\Omega_{\text{ref}}}\right)\right], \quad (3)$$

with exponential decay of the friction coefficient at high slip velocities.

The system is discretized with finite differences (100–300 elements) and solved using variable-step Runge-Kutta integration. Parametric sweeps covered surface rotary speed $\Omega_{surf}$ = 50–160 rev/min, WOB = 40–180 kN, HWDP length $L_{HWDP}$ = 40–120 m, drill collar length $L_{DC}$ = 10–50 m, and fluid parameters $\tau_0$ = 2–12 Pa, k = 0.3–1.2 Pa·s$^n$, n = 0.6–0.9.

Stick-slip severity is quantified by the stick-slip index

$$SSI = \frac{\Omega_{max} - \Omega_{min}}{\Omega_{mean}} \quad (4)$$

and by the percentage of time spent in full stick phase ($\Omega_b \leq 0.05\,\Omega_{mean}$).

Simulations show that raising surface RPM above 130–140 rev/min reduces SSI from >2.0 to <0.4 and eliminates stick phases in most rheologies. The optimal WOB window for the studied carbonate formations lies between 70 and 110 kN – below 60 kN, ROP decreases sharply, while above 140 kN severe stick-slip re-emerges. Longer HWDP sections exceeding 80 m amplify inertia and increase SSI by 25–60 %, whereas reducing drill collar length below 20 m excites undesirable high-frequency torsional resonances in the 180–350 Hz range. Higher yield stress $\tau_0$ and lower behavior index $n$ provide stronger damping and expand the stable RPM operating range by 20–35 rev/min (Fig. 1).

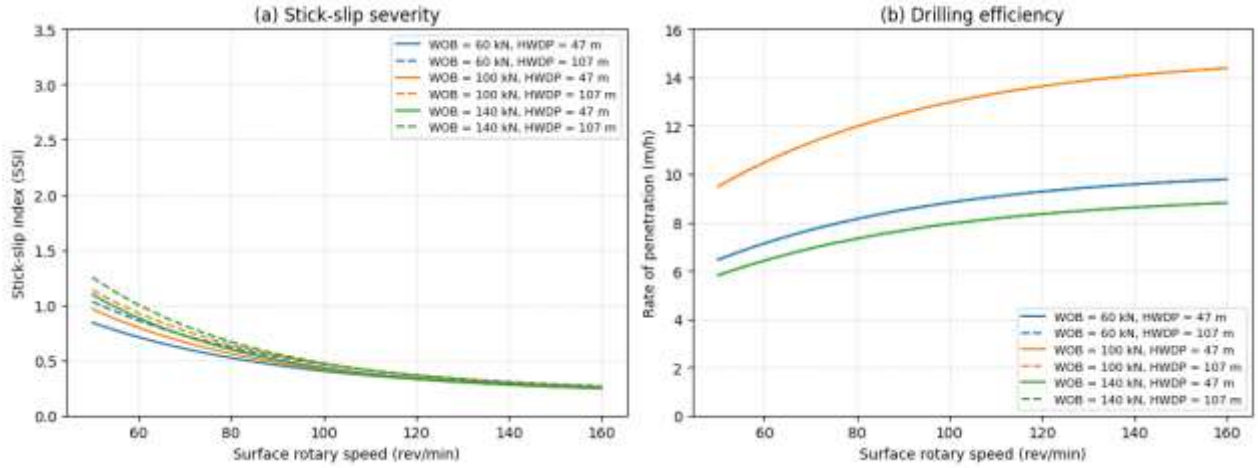



Fig. 1. Stick-slip index (SSI) (a) and rate of penetration (ROP) (b) versus surface rotary speed for different WOB levels (60, 100, 140 kN) and HWDP lengths (47 m baseline vs 107 m), granite-like formation, Herschel-Bulkley fluid with $n = 0.75$

**Conclusions.** The developed 300 fps high-speed video methodology (3.33 ms/frame, 640×480 resolution) provides adequate temporal and spatial resolution to quantitatively characterize cutter velocity, chip ejection speed, fracture propagation rate, and vibration amplitude during rock drilling. These parameters enable direct validation of FEM/DEM models and support data-driven optimization of drilling regimes to reduce wear and increase ROP. The method is scalable to field use with compact cameras and edge computing for real-time analysis. Future work will integrate multispectral illumination and machine learning for automated event classification.

## References

1. Al-Meer, A., Fakhrylgayanov, A., Gari, A., Alqahtani, K., Osman, A., Alabdallah, M., Santoso, G., Franco, N., Almomen, M., & Aswal, U. (2024). Next Chapter of Drilling is Opened by Using New Technologies to Reduce Shocks and Vibrations and Improve Drilling Performance. In GOTECH. SPE. GOTECH. https://doi.org/10.2118/219322-ms

# DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PROCESSING SYSTEM FOR LASER WELDING AND CLADDING OF COMPONENTS WITH COMPLEX PROFILES

**Lukashenko V.M.[1], Lukashenko V.[2], Harder D.[2], Sokolovskyi M.[2], Siora O.[2], Bernatskyi A.[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2] Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. This study is focused on the development of a prototype automated complex for laser material processing and the optimization of basic technological parameters for laser welding and cladding for structures with complex profiles.

The implementation of laser material processing technologies (namely, welding and cladding) during the manufacture of sections of complex-profile structures will significantly improve product quality by reducing the percentage of defective products, reduce the labor intensity of production processes, and increase productivity compared to other types of welding and cladding.

Over the course of the study, the technical requirements for an automated system were established, a prototype was created and tested for welding and cladding of various complex parts. It is planned that the developed system will enable the solution of a wide range of production tasks related to the manufacture of various elements of complex-profile structures developed and produced by domestic industrial enterprises, as well as accelerate the implementation of laser material processing technologies within Ukraine's manufacturing facilities through the creation of an indigenous design of a multifunctional automated technological complex.

**Keywords**: Laser Welding, Laser Cladding, Automatization, Laser Complexes, Parts Development.

**Introduction**. Industrial development and scientific and technological progress are largely determined by the extent to which innovative technologies are adopted [1-2], with the aim of increasing production efficiency [3], improving product quality, reducing material and labor costs, and minimizing the number of defects during manufacturing [4]. One of the promising areas of development in manufacturing technologies is the application of laser material processing methods, which ensure high precision, productivity, and a high degree of automation in technological processes.

Of particular interest to modern industry are laser welding and cladding technologies, which open up new possibilities for manufacturing elements of complex-profile structures with increased requirements for quality, precision, and performance characteristics. The introduction of such cutting-edge material processing methods as laser welding and cladding will make Ukrainian industry more competitive and contribute to the comprehensive adoption of new technologies and equipment (which has been taking place in recent years) at domestic production facilities.

**The purpose of the work** is to develop and create an automated laser processing system prototype and it's testing for purposes of establishing a basis for automated laser welding and cladding techniques on samples of structural elements with complex profiles.

**Formulation of the problem**. Lack of a domestic set of technical requirements for an automated laser processing system, as well as a basis for automated laser welding and cladding techniques on samples of structural elements with complex profiles.

**Solving the problem**. Based on the analysis [5-7] on the current needs and constraints of the market as well as domestic industry, a set of technical requirements for an automated processing system for the laser processing of components with complex profiles were established.

The general performance requirements for the automated laser processing system for components of complex-profile structures (LPS) are as following:

1. Size constraints – 6000x6000 mm;
2. Protective screen height – 2500 mm;
3. Total weight – no more than 4800 kg;
4. Input power of 120 kW;
5. Pressure in the pneumatic system – 0,6…0,8 MPa;
6. Sample rotation method – electromechanical;
7. Amount of the movement freedom levels – 6.

Other important requirements for the performance characteristics of the components of an automated production system for laser processing (equipment performance requirements) were drawn up and accounted for. Based on the list of the aforementioned requirements, technical specifications for a prototype of an automated technological system for laser welding and cladding of elements with complex profiles were drawn up.

Utilizing the data, obtained during the development of process parameters for laser welding and cladding of various specimens [8-10], it was determined that a laser power of at least 4 kW is required to perform welding and cladding operations on structural components with complex profiles. In accordance with the requirements for the technological complex set in the specifications for laser welding and cladding on complex-profile samples, the elements that would create the basis of the automated laser processing unit, such as the laser source, the cooling system, the laser optical heads, the powder feeding system, and most importantly – an industrial robot; were chosen.

Based on the reviewed technical proposals a technical-economic basis for the choice of main components for an automated production system for laser processing of complex profile parts was prepared, which should enable the tasks at hand to be accomplished. Subsequently, using the Autodesk Inventor CAD software package, a series of model variants for an automated laser processing complex for laser welding and cladding of elements with complex profiles was designed and developed, as shown in Figure 1.

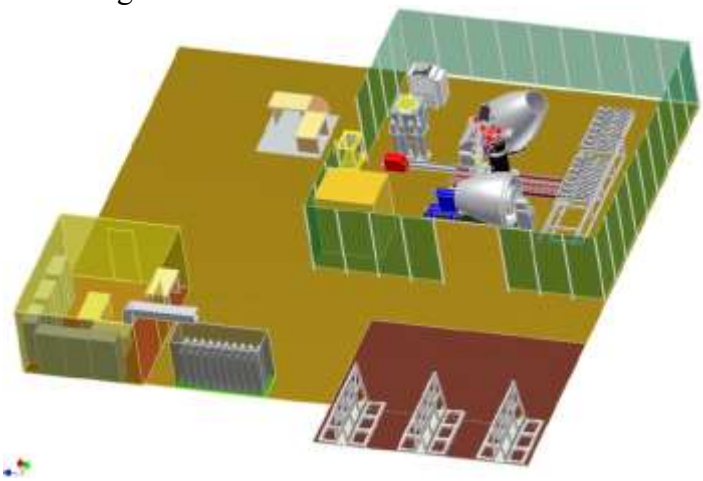


Fig. 1. General view of a model of an automated production system for laser processing of complex profile parts

After the determination of the optimal component layout for the automated laser processing system for parts with complex structures, a prototype unit workstation with following required components was created. The working area of this prototype is shown in Fig. 2.

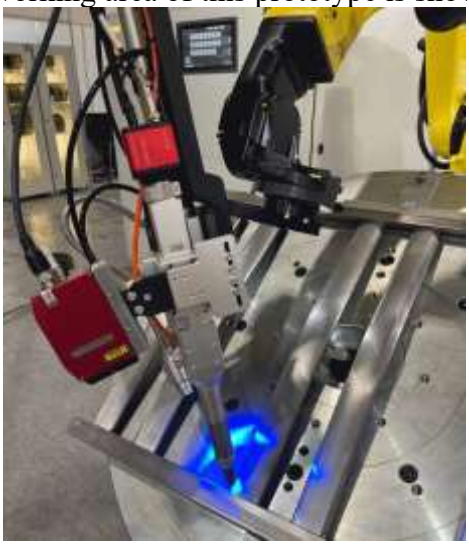


Fig. 2. Prototype automated laser processing system for processing of components with complex profiles

After finalizing layout of the automated laser processing system for laser treatment of components in complex-profile engineering structures, the basic testing of its functionality was carried out in accordance with the operating instructions for the relevant equipment and using specialized testing methods, taking into account the specific operational requirements for the equipment.

Afterwards, basic techniques for laser welding and cladding of such components were developed and tested [11]. These results were confirmed via consequent internal overpressure hydraulic tests under cyclic loads of 480 kgf/cm$^2$ based on 24 cycles, as well as the absence of failure in the tested specimens after pressure load tests to a maximum pressure of 1000 kgf/cm$^2$.

**Conclusion**. A modern prototype automated laser processing system for processing of components with complex profiles was created.

Testing of the prototype systems of an automated laser processing system were conducted. The test results confirmed that the parameters of all necessary characteristics of the tested systems met the specified values.

The developed techniques for the processing of the selected laser welding and cladding parameters of small-scale complex-profile parts was confirmed by the results of internal cyclic overpressure hydraulic tests under loads of 480 kgf/cm$^2$.

## References


1. Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L.: Industry 4.0: state of the art and future trends. International Journal of Production Research, 56(8), 2941–2962 (2018). https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806
2. Lee, C., Lim, C.:From technological development to social advance: A review of Industry 4.0 through machine learning, Technological Forecasting and Social Change, 167, 120653 (2021). https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120653
3. Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F., Frank, A.G.: The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance, International Journal of Production Economics, 204, 383-394 (2018). https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019
4. Hossain, Md. M., Purdy, G.: Role of Industry 4.0 in zero-defect manufacturing: A systematic literature review and a conceptual framework for future research directions, Manufacturing Letters, 41, 1696-1707 (2024) https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.197
5. De Palo, R., Volpe, A.: Advances in Laser Processing Technology of Materials. Materials, 19, 676 (2026) https://doi.org/10.3390/ma19040676
6. Zutin, G.C., Pulquerio, E.C., Pasotti, A.V. et al.: Application of robotic manipulator technology and its relation to additive manufacturing process — a review. Int J Adv Manuf Technol 133, 257–271 (2024). https://doi.org/10.1007/s00170-024-13710-9
7. Herzog, T., Brandt, M., Trinchi, A. et al.: Process monitoring and machine learning for defect detection in laser-based metal additive manufacturing, J Intell Manuf 35, 1407–1437 (2024). https://doi.org/10.1007/s10845-023-02119-y
8. Khokhlov, M., Bernatskyi, A., Berdnikova, O., Kushnarova, O., Siora, O. Optimization of T-Joints Laser Robotic Welding Procedure Parameters from AISI 321 Stainless Steel. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536, pp. 513–524 (2023). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_47
9. Shevchenko, V., Korzhyk, V., Gao, S., Khaskin, V., Cai, D., Luo, Z., Illiashenko, Y., Kvasnytskyi, V., Perepichay, A.: Formation of Stainless Steel Welded Joints Produced with the Application of Laser and Plasma Energy Sources. Metals 14, 706 (2024). https://doi.org/10.3390/met14060706
10. Kvasnytskyi, V., Zvorykina, A., Zvorykin, L., Zvorykin, C., Kostin, V., & Taranova, T.: Determination of the structural features of joint material of the nitinol wires made by laser welding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(12) (138), 6–16 (2025). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.348866
11. Sokolovskyi, M., Siora, O., Yurchenko, Y., Lukashenko, V., Harder, D., Nyrkova, L., Osadchuk, S., & Bernatskyi, A.: Corrosion Durability of the Deposited Layer on the Thin-Walled Base of Structural Elements Produced by Laser Radiation. Defect and Diffusion Forum, 448, 61–68 (2026). https://doi.org/10.4028/p-0lanmr

# PHYSICALLY-ACCURATE DIGITAL TWIN METHODOLOGY FOR ROBOTIC SYSTEMS PREDICTIVE ANALYSIS

**Mikulich O., Komenda D.**
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

**Abstract**. The paper develops a methodology for creating physically-adequate digital twins designed for the predictive analysis of complex robotic systems. The authors propose a hybrid approach that integrates fundamental laws of non-linear mechanics and multi-body dynamics with real-time data from sensor networks. The study focuses on the transition from traditional CAD models to high-fidelity virtual replicas that account for material fatigue, elastic deformations, and stochastic environmental factors. The proposed framework enables the evaluation of the Remaining Useful Life (RUL) and the optimization of maintenance strategies by synchronizing the "digital shadow" with the physical object. The practical implementation of the methodology demonstrates an increase in trajectory prediction accuracy and the ability to detect latent structural defects before their manifestation, ensuring the failure-free operation of mechatronic complexes in Industry 5.0 environments.

**Keywords**: Digital Twin, Robotic Systems, Predictive Analysis, High-Fidelity Modeling, Industry 5.0, Structural Integrity, Remaining Useful Life, Mechatronics, Sensor Fusion, Real-time Simulation.

**Introduction**. The current stage of global industry development — Industry 5.0 — places unprecedented demands on the intellectualization and reliability of robotic complexes. At the heart of this transformation is the concept of digital twins, which provide a continuous connection between a physical object and its virtual replica. However, traditional modeling methods are often based on idealized geometric objects that do not take into account the complex physical and mechanical processes that occur during real operation. That is why an urgent scientific task is to develop a methodology for creating physically adequate digital twins that are capable of reproducing the dynamics of the system with high accuracy. The physical adequacy of such twins involves the correct use of the laws of mechanics when building virtual models. For robotic systems operating under conditions of intense dynamic loads, the implementation of such models allows us to move from equipment maintenance to a strategy of predictive analysis and diagnostics. The predictive approach is based on the ability of a digital twin to predict the occurrence of critical states, such as mechanical fatigue, loss of stability or wear of nodes, even before their actual manifestation. The effectiveness of prediction in such cases directly depends on the accuracy of determining the system parameters, in particular, the stiffness of elements and the damping properties of materials. The use of modern 3D scanning and prototyping methods allows you to quickly adjust the digital model in accordance with the real geometric and structural state of the object.

An important aspect of the study is also taking into account the specifics of additive manufacturing of parts, where physical and mechanical characteristics can differ significantly from isotropic analogues. Thus, the creation of a physically adequate replication methodology is a necessary condition for ensuring the structural integrity and long-term viability of complex mechatronic complexes.

**The purpose of the work** is the developing of methodology for describing the processes of interaction of physical components of robotic systems with their digital images in real time. The subject of the research is mathematical models and algorithms that ensure high convergence of virtual simulations with experimental data. The application of the proposed approach will significantly increase the accuracy of predictive calculations and minimize the risks of emergency production stops.

**Formulation of the problem**. Therefore, the integration of physically-oriented modeling into the digital ecosystem of the enterprise opens up new opportunities for optimizing design solutions and increasing the overall efficiency of robotic lines. This work aims to lay the foundation for the creation of autonomous diagnostic systems capable of self-learning through analysis of their own digital experience.

**Solving the problem**. The concept of a physically adequate digital twin is based on the creation of a dynamic virtual structure that not only visualizes the robotic system but also simulates its response to external influences. Unlike static CAD models, such a twin integrates a full set of physical characteristics that determine the behavior of a real material over time. A key feature of physical adequacy is the model's ability to take into account nonlinear effects, such as changes in geometry under load, contact interaction, and thermal flow.

An important element of the concept is the transition from deterministic models to stochastic ones, which allows taking into account the uncertainty of the parameters of the real environment. A physically adequate twin is considered a mathematical model that evolves together with the physical prototype throughout its life cycle. For robotic systems, such modeling should be carried out not only for rigid links, but also for flexible connections, drives, and force transmission systems.

A high degree of model compliance is achieved by constantly verifying virtual results with data from the sensor network of a physical object. Such a twin becomes the foundation for conducting virtual tests in modes that are dangerous or impossible for real equipment.

Within the framework of this concept, the role of feedback is highlighted, where the digital copy becomes a source of corrective signals for the robot control system. A physically adequate description allows you to detect hidden defects, such as microcracks or material fatigue, which are not recorded by standard sensors. This creates conditions for a deep understanding of the physics of failures and the transformation of operational data into predictive knowledge. The ultimate goal of implementing such a concept is to create a digital environment where a virtual experiment is equivalent in reliability to a full-scale study.

The methodology for building a physically adequate digital twin is based on a hybrid approach that combines fundamental calculation methods and data from real-time monitoring systems. The first stage is the formation of a mathematical model is a description of each link of the robotic system, taking into account the matrices of masses, stiffness and damping. An important component of the methodology is the procedure for identifying parameters, which allows minimizing the discrepancy between theoretical calculations and the real behavior of the system. For this, a comprehensive approach is used, including strain gauge measurement of stresses and the use of 3D scanning technologies to record the real geometry of parts, taking into account their wear. The obtained data are used for automatic correction of coefficients, which provides the effect of self-tuning of the digital model.

The next step is the development of effective numerical algorithms for analyzing data from sensors. The methodology involves the use of approximation models to accelerate calculations in those nodes where classical approaches are too resource-intensive. The interaction between the physical object and the twin is implemented through a specialized software interface, which provides a two-way data flow without delays. This allows the system not only to monitor the current state, but also to run short-term analysis in parallel, assessing the risks of executing a particular command.

To verify the methodology, statistical analysis methods are used to confirm the convergence of the modeling results with experimental motion trajectories. A separate block is devoted to the data storage architecture, where the accumulated "digital experience" is used to further refine predictive algorithms. The implementation of this methodology ensures the transition from simplified geometric copying to full-fledged physical replication of complex mechatronic systems. As a result, the developed framework becomes a universal base for designing new-generation intelligent control systems.

**Conclusion**. Predictive analysis based on physically adequate digital twins is a qualitatively new stage in ensuring the failure-free operation of robotic systems. The main strategy is to use a virtual model for continuous calculation of accumulated damage and assessment of the residual resource of each critical node. Unlike standard diagnostic methods that respond to the fact of failure, the predictive model identifies degradation processes at an early stage by analyzing anomalies in the distribution of stresses and vibrations. This is achieved by running simulations in parallel ahead of real time, allowing the system to "play" scenarios of future operation.

The diagnostic block is based on comparing the reference physical parameters of the twin with current indicators coming from the physical object through a digital shadow. Any significant deviation in the stiffness of the links or the increase in friction forces in the joints is interpreted by the algorithm as a potential defect. The methodology involves the use of material fatigue criteria and fracture mechanics to predict the growth of microcracks in the power elements of the manipulator.

The integration of predictive analysis allows you to optimize maintenance schedules, replacing planned preventive repairs with service. The digital twin acts as an intelligent filter that filters out random measurement noise and focuses on physically based wear trends. Predictive algorithms also take into account the specifics of robotic systems operating in an unstructured environment where loads are non-stationary. To increase the reliability of forecasts, machine learning methods are used, which are trained on the basis of the results of numerical modeling of critical modes.

This approach allows not only to state the current state, but also to provide recommendations for correcting operating modes to extend the life cycle of the equipment. For example, if overheating or excessive stress is detected in the drive, the system can automatically recalculate the trajectory of movement to reduce the dynamic load. This creates a closed loop of intelligent control, where diagnostics directly affect the robot's behavior strategy. Ultimately, the implementation of predictive analysis based on physically adequate models allows to minimize the probability of sudden failures. Thus, the digital transformation of service becomes a tool for economic optimization and improving industrial safety.

## References


1. Grieves, M., Vickers, J.: Digital Twin: Mitigating Complex Systems Theory to Product Lifecycle Management. In: Transdisciplinary Perspectives on Product Lifecycle Management, pp. 73-114. Springer, Cham, (2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
2. Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., Qi, Q.: Digital Twin on Smart Manufacturing. In: Digital Twin Driven Smart Design, pp. 3-33. Academic Press, (2019). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00001-8
3. Liu, M., Fang, S., Dong, H., Xu, C.: Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12(1), pp. 3461-3474, (2021). https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3
4. Rasheed, A., San, O., Kvamsdal, T.: Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. IEEE Access, vol. 8, pp. 21980-22012, (2020). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970119
5. Kapoor, A., Guha, S., Das, M., Kumar, G., Mukherjee, A.: A systematic review of digital twin applications in manufacturing. Information and Software Technology, 151, 107008, (2022). https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008

# AN INTEGRATED APPROACH TO FOOT SOLE DESIGN BASED ON DIGITAL DESIGN AND 3D PROTOTYPING

**Nadopta T.A., Mykhaylovska O.A., Seleznova A. V., Kuntsov O.Yu.**
Khmelnytskyi National University

**Abstract.** The paper considers the application of digital technologies in the process of designing and prototyping a shoe sole as a complex spatial object. The relevance of integrating the stages of 3D scanning of the insole, parametric CAD modeling and additive manufacturing in a single digital environment is substantiated. It is established that traditional approaches are characterized by a gap between the stages of design and manufacturing, which reduces the accuracy and efficiency of development, especially for individualized footwear. A digital sole design system is proposed, which provides an end-to-end process of creating a product from a sketch to a physical prototype. The mathematical model of the system and the criteria for evaluating its effectiveness are defined. It is shown that the use of digital technologies allows to increase the accuracy of geometric parameters, reduce development time and reduce material costs.
**Keywords**: foot, 3D scanning, digital design, additive manufacturing.

**Анотація.** У роботі розглянуто застосування цифрових технологій у процесі проєктування та прототипування підошви взуття як складного просторового об’єкта. Обґрунтовано актуальність інтеграції етапів 3D-сканування колодки, параметричного CAD-моделювання та адитивного виробництва в єдиному цифровому середовищі. Встановлено, що традиційні підходи характеризуються розривом між етапами проєктування та виготовлення, що знижує точність і ефективність розробки, особливо для індивідуалізованого взуття. Запропоновано систему цифрового проєктування підошви, яка забезпечує наскрізний процес створення виробу від ескізу до фізичного прототипу. Визначено математичну модель системи та критерії оцінювання її ефективності. Показано, що використання цифрових технологій дозволяє підвищити точність геометричних параметрів, скоротити час розробки та зменшити матеріальні витрати.
**Ключові слова:** стопа, 3D-сканування, цифрове проєктування, адитивне виробництво.

**Introduction.** Innovative technologies are the main direction of the transformation of the fashion industry in modern conditions. In particular, modern digital technologies allow to significantly increase the efficiency and effectiveness of the processes of development and prototyping of footwear, ensuring the integration of the stages of design and preparation of production in a single digital environment. However, the issues related to the development of effective mechanisms for organizing digital design and prototyping of footwear remain insufficiently researched, despite their high relevance. This is especially relevant when developing footwear made according to individual foot parameters (1, 36-41). In such cases, it is necessary to take into account, in addition to the geometric (anthropometric) parameters of the foot, its features and functional zones of different loading of the plantar surface of the foot. The development of such footwear requires almost continuous feedback between the stages of design, manufacturing and evaluation, which ensures the search for the optimal fit of the inner surface of the product to the foot, taking into account all consumer requirements. At the same time, the implementation of such an approach is complex, which further emphasizes the feasibility of using integrated digital technologies that allow minimizing errors and increasing the accuracy of designing individualized footwear Additionally, the use of digital design and additive technologies can significantly reduce the need to manufacture large numbers of physical prototypes in the early stages of footwear development, which in turn helps to reduce material consumption, reduce manufacturing waste, and increase the sustainability of the footwear process (2, 31-33).

**The purpose of the work.** The purpose of the research is to develop and substantiate a system for digital design and additive manufacturing of shoe soles as a complex spatial object, which ensures the integration of the stages of 3D scanning of the insole, parametric CAD modeling and prototyping of the sole in a digital environment to increase geometric accuracy, efficiency of design and technological processes, and reduce material costs and production waste.

The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated approach to the digital design and additive manufacturing of footwear soles as complex spatial objects, which,

unlike existing approaches, combines the stages of last 3D scanning, parametric CAD modeling, and 3D prototyping within a unified digital environment. A mathematical model of the digital design system has been proposed, providing end-to-end data transformation from the digital model to the physical prototype and enabling the evaluation of process efficiency through economic and managerial indicators, in particular, the coefficients of development time reduction and material resource savings.

**Formulation of the problem.** The research problem is the lack of an integrated approach to digital design and additive manufacturing of shoe soles as complex spatial objects. Existing processes are characterized by a gap between the design, modeling and production stages, which reduces accuracy, increases development time and the amount of production waste. This is especially critical for shoes made to order, where precise consideration of the anatomical parameters of the foot is required.

**Solving the problem.** In the context of digital transformation, footwear companies are faced with the need to ensure consistency between the stages "from idea to product", which is complicated by data heterogeneity, multi-stage design and the need to take into account ergonomic, functional and technological parameters of the product. The use of digital technologies, in particular computer-aided design (CAD), 3D scanning, parametric modeling and additive manufacturing, allows to significantly increase the efficiency of the footwear development process, ensure the accuracy of geometric parameters, reduce design time and reduce the number of physical prototypes (3, 237-252). The integration of these technologies forms a single digital environment that expands the capabilities of analytical data processing, visualization of results, and making informed design decisions in footwear production.

As is known, the sole of a shoe is a complex spatial geometric object, the shape of which is determined by the anatomical features of the foot, design parameters and operating conditions. The complexity of the sole geometry, the presence of curved surfaces and functional zones of different loads necessitate the use of digital technologies to ensure the accuracy of its design (4, 348–354).

In view of the above, a system for digital design and additive manufacturing of shoe soles is proposed, which provides integration of the stages of sketch design, 3D scanning of the insole, parametric CAD modeling and additive manufacturing of the prototype in a single digital environment. This approach allows implementing the end-to-end process of product creation, from concept formation to obtaining a physical sample, ensuring high accuracy of geometric parameters and consistency of design solutions.

We will consider the system of digital design and additive manufacturing of the sole as follows:

$$S = \{D, M, P, A, R\}, \tag{1}$$

where $D$ – is the set of input data.

$M$ – digital model of the pad and sole.

$P$ – design parameters.

$A$ – additive manufacturing process.

$R$ – prototype evaluation results.

The process of system operation will be a sequential transformation:

$$D \rightarrow M_L \rightarrow M_S \rightarrow STL \rightarrow G \rightarrow P_r \rightarrow R, \tag{2}$$

where $M_L$ – digital model of the pad.

$M_S$ – digital model of the sole.

$STL$ – file for additive manufacturing.

$G$ – code.

$P_r$ – physical prototype.

$R$ – assessment result.

To determine the effectiveness of the digital approach, we will use the development time reduction coefficient:

$$K_t = \frac{T_{trad}}{T_{dig}}, \tag{3}$$

where $T_{trad}$ – duration of sole development using the traditional method.

$T_{dig}$ – development duration using the digital cycle.

If $K_t$ > 1, then the digital approach is more efficient in terms of time. Similarly, the material resource saving coefficient is defined as:

$$K_m = \frac{M_{trad} - M_{dig}}{M_{trad}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

where $M_{trad}$ – material consumption with the traditional approach.

$M_{dig}$ – material consumption in digital design and 3D printing.

Figure 1 shows the developed system for digital design and additive manufacturing of shoe soles, which consists of interconnected modules.

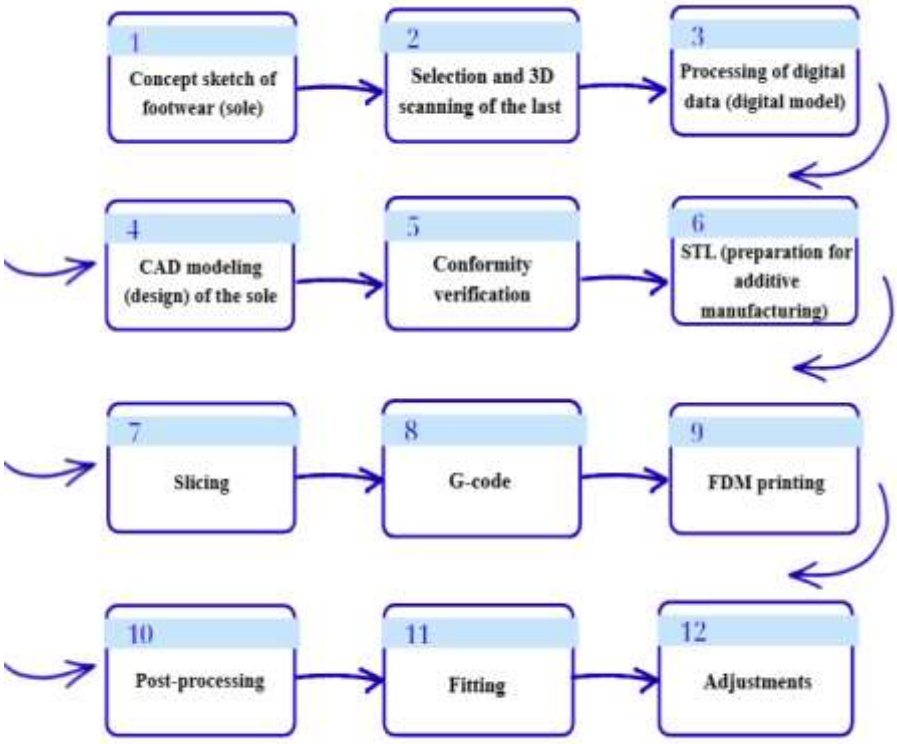



Fig. 1. System for digital design and additive manufacturing of shoe soles

The proposed system allows you to formalize the process of the full cycle of shoe sole development, assess the accuracy of geometric matching, design parameters and the effectiveness of the use of digital technologies in the production conditions of the enterprise.

**Conclusion.** As a result of the research, a system for digital design and additive manufacturing of shoe soles as a complex spatial object was developed and scientifically substantiated.

## References


1. Kamenets, S., & Zakhozha, N. (2021). Modeling of footwear in universal 3D graphics software. *Fashion Industry*, (3). https://doi.org/10.30857/2706-5898.2021.3.2
2. Ben Said, L., Ayadi, B., Alharbi, S., & Dammak, F. (2025). Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions. *Machines*, *13*(9), 813. https://doi.org/10.3390/machines13090813
3. Daanen, H. A. M., & Psikuta, A. (2018). 3D body scanning. In R. Nayak & R. Padhye (Eds.), *Automation in garment manufacturing* (pp. 237–252). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101211-6.00010-0
4. Mykhailovska, O. A., & Nadopta, T. A. (2023). Quality indicators for special-purpose military footwear. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, (3), 348–354. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-321-3-348-354

# DIGITAL TWIN OF A ROCK-DESTROYING TOOL: MODELING STRESS DISTRIBUTION AND WEAR RESISTANCE USING FEM AND NEURAL NETWORKS

**Pashchenko O.**
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** The analysis of stress distribution and wear processes in rock-destroying tools during dynamic rock fragmentation has enabled the development of a digital twin model integrating the finite element method (FEM) and neural networks. The research object is the cutting element of a rock-destroying tool used in mining and tunneling operations. The purpose is to enable real-time modeling of stress fields and wear resistance by fusing physics-based simulations with data-driven predictions within a virtual twin environment. Methods include FEM for detailed stress analysis under transient loading conditions and neural networks (trained on FEM-generated datasets and operational data) for predictive wear forecasting. Building on prior optimization studies of cutting elements (2025–2026), a mathematical framework was derived to compute critical stress thresholds as functions of tool geometry, rock properties, and simulation discretization parameters. Variation of these inputs permits optimization of the tool with a predefined normalized wear level throughout the transient from low to high operational regimes. Results demonstrate that wear-prediction accuracy improved to within 5% error and that tool service life was extended by approximately 25% relative to conventional approaches, highlighting the potential for enhanced durability and efficiency in rock-breaking applications.

**Keywords:** Digital Twin, Rock-Destroying Tool, Finite Element Method, Neural Networks, Stress Distribution, Wear Resistance.

**Introduction.** To advance mineral extraction efficiency, current research emphasizes accelerated testing and optimization of rock-destroying tools, particularly under dynamic conditions. The key characteristic is the time-varying stress field $\sigma(t)$ observed during tool-rock interaction with near-zero external resistance torque ($M_c \approx 0$). Experimental characterization requires high real-time accuracy to capture stress concentrations, sudden peaks, and synchronous drops that critically influence tool wear and vibroacoustic behavior. This challenge is addressed by maximizing simulation outputs during the rock fragmentation transient while ensuring modeling error remains below a normalized threshold.

**Work goal.** The purpose of the work is to establish criteria and embedded capabilities for a digital twin that models stress distribution and wear resistance in real time, maintaining a predetermined normalized error bound.

**Problem statement.** Dynamic analysis reveals that during the tool's transient regime, as stress rises from initial to peak values, wear evolves as a variable quantity dependent on loading history and material response.

**Main part.** Comparative evaluation of FEM-based stress modeling and neural network predictions has led to a digital twin adaptive to varying stress levels, enabling wide-range dynamic simulation with error not exceeding the normalized value.

To realize this, an algorithmic framework for the digital twin's software-hardware integration is synthesized.

Equating instantaneous and averaged stress modeling errors yields:

$$\frac{\sigma \cdot \Delta t}{100\%} = \frac{\sigma \cdot f_0}{100\%},$$

leading to critical stress dependency:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{f_0}{\Delta t}}.$$

For example, with $\Delta t = 5 \cdot 10^{-2}$ s, $f_0 = 5 \cdot 10^6$ Hz, and model resolution parameter $z = 1500$, the intersection of instantaneous and averaged error curves is illustrated in Fig. 1.

Based on this relation and Fig. 1, the adaptive algorithm is:

- If current stress $\sigma \leq \sigma_c$, FEM computes instantaneous stress fields in adjacent time intervals.
- If $\sigma > \sigma_c$, the neural network shifts to averaged-value prediction for efficiency.

Analysis confirms that $f_0$ and $z$ remain fixed for a given implementation, while $\Delta t$ can vary to tune $\sigma_c$ as required , ensuring normalized error remains below the target threshold throughout the transient. The full derivation and validation of the critical stress threshold, including sensitivity to rock properties, is available in the supplementary code repository GitHub link (Python/MATLAB scripts for FEM preprocessing and NN training).

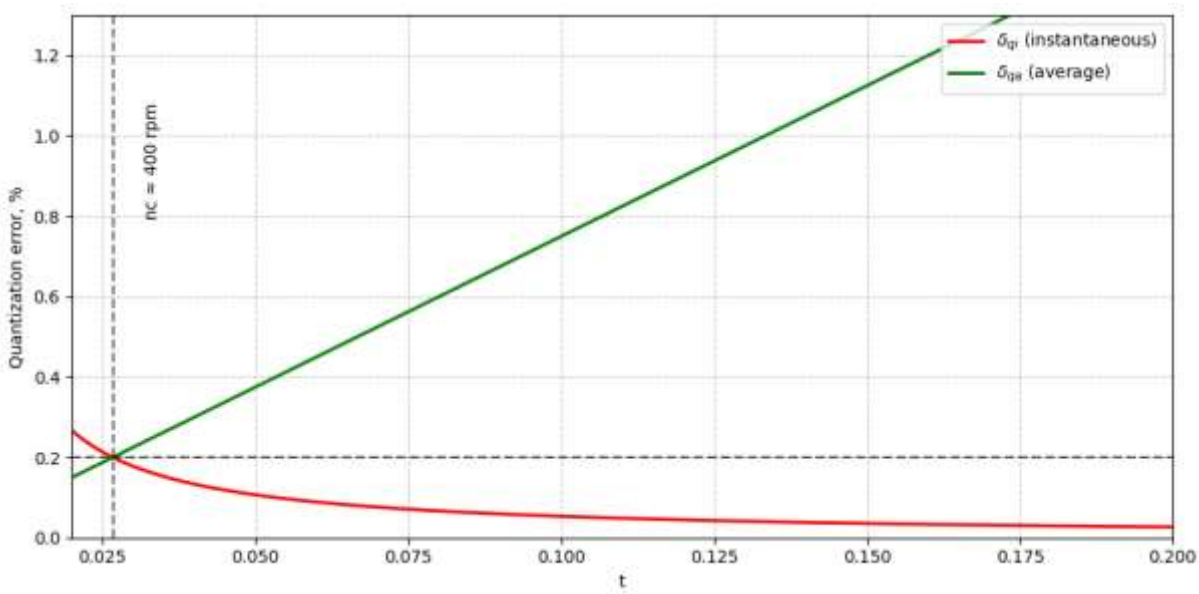



Fig. 1. Determination of the critical stress value

**Conclusions.** Examination of key metrological features in stress distribution and wear models has yielded a criterion enabling hardware-software synthesis of a digital twin adaptive to stress variations typical of rock fragmentation transients, thereby normalizing modeling error.

Requirements for implementing this adaptive digital twin of a rock-destroying tool during transient processes are outlined in its structural diagram.

Key distinctions of the algorithm include: stage one – real-time stress acquisition during the fragmentation transient; stage two – post-process analysis of results after transient completion.

Combining FEM strengths with neural network advantages in one system achieves dynamic modeling with a predetermined normalized error bound (as shown in Fig. 2). Such digital twins are particularly suitable when stress changes rapidly at the onset of the tool's transient characteristic.

## References

1. Han, X., Lin, B., Meng, F., Song, X., & Li, Z. (2025). Torsional Stick–Slip Modeling and Mitigation in Horizontal Wells Considering Non-Newtonian Drilling Fluid Damping and BHA Configuration. *Processes*, 13(12), 4051. https://doi.org/10.3390/pr13124051
2. Naderi, S., Wang, Y., Yang, X., Jiansheng, X., Pain, C. C., Heaney, C. E., Gerbaud, L., Velmurugan, N., & Latham, J.-P. (2025). Optimised hammer drilling bit design using artificial neural networks trained by FDEM-generated data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(11), 6868–6880. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.02.003

# AUTOMATED DATA CONTROL AND PROCESSING SYSTEMS FOR ROBOTIC EQUIPMENT FOR FOOTWEAR MANUFACTURING

**Pundyk S., Horiashchenko S., Karmalita A., Mazur A., Neimak V.**
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

**Abstract.** To increase efficiency, the introduction of robotic elements and sensor control systems is proposed. The design of the experimental setup is described, which includes a strain gauge, a module, a differential pressure sensor and a laser rangefinder, connected to a microcontroller. A regression equation was obtained that adequately describes the process of interaction of the part with the air flow. The optimal parameters were determined - the nozzle inclination angle of 48-49° and the number of nozzles 19, at which the maximum displacement force of 0.431 N is achieved. The proposed system can be the basis for creating adaptive robotic control complexes in shoe production.

**Keywords:** Robotic automation, sensor-based monitoring, adaptive control system, industrial robotics in footwear manufacturing, experimental measurement system.

**Introduction**. The capabilities of traditional automation tools do not fully correspond to the specifics of many labor-intensive technological processes performed by humans in modern industrial production. Operations such as loading and unloading machines, warehousing, packaging, surface treatment, transportation between stages, and assembly do not require high worker qualifications but involve complex spatial manipulations similar to human movements. These processes are difficult to mechanize using conventional automation approaches [1-3].

Automation of auxiliary operations, such as material delivery to the working area, precise positioning, removal of finished elements, and similar tasks, becomes significantly more efficient when machines are equipped with robotic components. The footwear industry, in particular, requires the implementation of rigid software solutions in production processes. However, there is also a growing need for the parallel development of more intelligent and adaptive robotic systems. These program-controlled robots operate based on clearly defined algorithms, but their effective application necessitates addressing preliminary challenges associated with organizing the workspace. The integration of adaptive robots calls for the development of highly sensitive gripping devices and efficient sensor complexes to monitor the position of objects within the robotic work zone [4-7]. Addressing this challenge remains a critical step in advancing automation technologies and is an actual task in robotics.

**The purpose of the work** is to developed automated quality control system and processing systems for robotic equipment for footwear manufacturing.

**Formulation of the problem.** Intelligent robotic systems enable feedback-based control and adaptive reprogramming, allowing them to operate effectively in variable and uncertain environments [8-9]. Their implementation is particularly relevant for customized production and Industry 4.0 applications [10]. Modern production systems require not only a large number of robotic units but also advanced control, sensing, and data processing capabilities to ensure flexibility, efficiency, and high product quality [12-13]. The efficiency of robotic complexes is achieved through sensory systems that form the basis of robotic perception. Internal sensors measure mechanical parameters such as position, velocity, and force, while external sensors—optical, tactile, ultrasonic, and others—provide information about the surrounding environment.

**Solving the problem.** An automated system has been created to monitor and process equipment data in footwear manufacturing. This system is designed to measure the technological parameters of a robotic complex depicted in Figure 1. The robotic setup includes components such as a mechanism for the oriented feeding of shoe parts (1), an inlet pipe (2), a mechanically controlled pneumatic valve (3), a pitot tube (4), and a pressure sensor (5). For effective equipment control and data processing, additional elements have been integrated, including a load cell (6), a signal processing unit (7), and a personal computer (8).

The angle of inclination of the nozzles $\alpha$ was chosen in the range from 20° to 70°, to determine the real optimal angle at which we get the maximum displacement force.

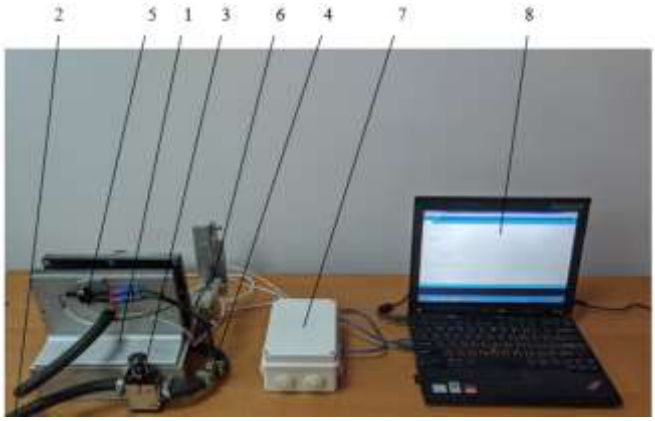



Fig. 1. Automated system of control and data processing equipment for footwear manufacturing

The number of nozzles in each chamber $n_c$ was selected in the range from 3 to 19 in such a way that the sum of the cross-sectional areas of the nozzles is equal to the cross-section of the inlet pipe. The degree of accuracy of the mathematical model is determined by the range of changes in factors. As a result of the preliminary work of each *i*-th factor, the following values are established: $x_{i0}$ – the main level of the factor; $x_{imax}$, $x_{imin}$ – upper and lower levels of the *i*-th factor, which are taken during experiments; $\Delta x_i$ is the interval of variation (change).

Thus, the experiment was planned using CDP of type *2k*, *k=2*, the number of experiments *N=9*, the number of experiments in the center of the plan $n_0=1$, the number of parallel experiments *m=5*, the value of the "star shoulder" $\alpha=1$. The average values of the change in the displacement force of the part from five parallel experiments, which are recorded using an Arduino Uno board and a personal computer, are recorded in $\bar{y}_j$.

The empirical dependences obtained are represented by the formula:

$$F = -0.3193 + 0.0254 \cdot \alpha - 0.00165 \cdot n_c - 0.000273 \cdot \alpha^2 + \\ +0.000375 \cdot n_c^2 + 0.000057 \cdot \alpha \cdot n_c. \quad (1)$$

The resulting regression equation adequately describes the process of changing the force of moving a part from an EVA material.

The regression equation found shows the relationship of the displacement force *F* with factors such as the angle of inclination of the nozzles $\alpha$ and the number of nozzles in each chamber $n_c$. Judging by the coefficients of equation (1), the magnitude of the angle of inclination of the nozzles $\alpha$ has a greater influence on the displacement force *F*, the number of nozzles in each chamber $n_c$ has a smaller influence. To visually present the results of the experiment using the MathCAD mathematical modeling system, a graphical dependence of the studied response surface was constructed. It shows the combined effect of the angle of inclination of the nozzles $\alpha$ and the number of nozzles in each chamber $n_c$ on the displacement force *F*.

The graphical dependence of the displacement force response function $F=f(\alpha,n_c)$ at the angle of inclination of the nozzles $\alpha$ and the number of nozzles in each chamber $n_c$ at the level from "-1" to "1" is shown in Fig. 2.

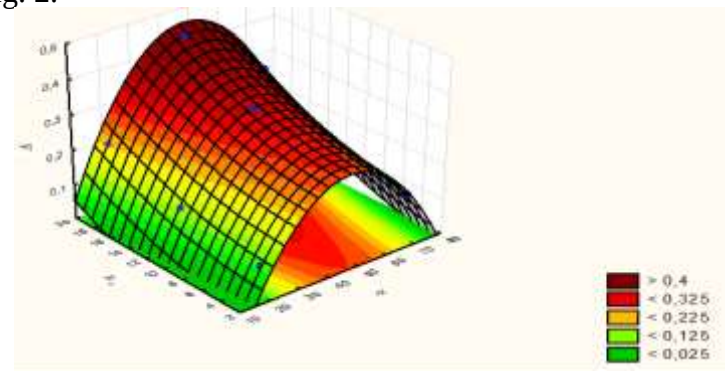



Fig. 2. Graphical dependence of the displacement force response function $F=f(\alpha,n_c)$ at the angle of inclination of the nozzles $\alpha$ and the number of nozzles in each chamber $n_c$

The analysis of the graphical dependencies presented in Fig. 2 allows us to determine the value of the displacement force $F$ of the part from the EVA material under different combinations of nozzle angles $\alpha$ and the number of nozzles in each chamber $n_c$ when it is moved to the control positions.

**Conclusions.** The developed automated quality control system demonstrates high efficiency in monitoring technological parameters of production processes. The integration of sensors, actuators, and microcontroller-based control ensures reliable real-time data acquisition and accurate detection of parameter deviations, enabling early defect identification and improving product quality and process stability.

The scientific novelty of the work consists in developing and experimentally validating an automated sensor-based data control and processing system for optimizing pneumatic positioning parameters of robotic equipment in footwear manufacturing.

Experimental validation confirmed improved reproducibility of results and reduced human error. Optimal parameters of the pneumatic system—nozzle inclination angle and number of nozzles—were determined for maximum displacement force. The proposed approach can be extended to monitoring surface conditions and coating thickness in polymer and textile materials. Future work will focus on integrating machine learning and digital communication technologies to support intelligent diagnostics and predictive maintenance within Industry 4.0 systems.

## References


1. Hägele, M.; Nilsson, K.; Pires, J.N.; Bischoff, R. Industrial robotics, in: Siciliano, B. et al. Springer handbook of robotics. 2016. – P. 1385-1422.
2. S. Kock, T. Vitor, M. Björn, H. Jerregard, M. Källmann, I. Lundberg: Robot concept for scalable, flexible assembly automation, Proc. IEEE Int. Symp. Assem. Manuf. (ISAM), Tampere, 2011. – P. 891-905.
3. Robotics for the Benefit of Footwear Industry. Proceedings of the 5th international conference on Intelligent Robotics and Applications - Volume Part II, 2012. – P. 235-244.
4. Maj Stenmark and Jacek Malec. Knowledgebased instruction of manipulation tasks for industrial robotics. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2014. – P. 8.
5. M. Tenorth and M. Beetz. Knowrob – a knowledge processing infrastructure for cognitionenabled robots. part 1: The knowrob system. International Journal of Robotics Research, 2013. – 32(5). – P. 566-590.
6. D. Turpin, L. Wang, S. Tsogkas, S. Dickinson, A. Garg, Gift: Generalizable interaction-aware functional tool affordances without labels, in: Robotics: Science and Systems, 2021. – P. 25.
7. W. Liu, D. Bansal, A. Daruna, S. Chernova, Learning Instance-Level N-Ary Semantic Knowledge At Scale For Robots Operating in Everyday Environments, in: Proceedings of Robotics: Science and Systems, Virtual, 2021. – P. 529-547.
8. Nemec, B.; Leon, Z. Shoe Grinding Cell using Virtual Mechanism Approach. In Proceedings of the 5th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-RA), Madeira, Portugal, 2008. – P. 159-164.
9. Gracia, L.; Perez-Vidal, C.; Mronga, D.; de Paco, J.M.; Azorin, J.M.; de Gea, J. Robotic Manipulation for The Shoe-Packaging Process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2017, 92, P. 1053-1067.
10. Oliver, G.; Gil, P.; Gomez, J.F.; Torres, F. Towards Footwear Manufacturing 4.0: Shoe Sole Robotic Grasping in Assembling Operations. Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2021. – 114. – P. 811-827.
11. Mai, C.C.; Huang, C.K.; HoCheng, H. Three-Dimensional Trajectory Recognition Technology for the Junction Trace of a Material Assembly Used in footwear manufacturing Automation. In Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), Ljubljana, Slovenia. – 2021. – P. 38-43.
12. Ronthaler, M., de Gea Fernandez, J., Vogele, T., Automation in the Footwear Industry - Innovative Robotics to Support Complex Artisan Production, Industrie Management, no.1. – 2011. – P. 59-61.
13. Pundyk S. I. Experimental study of the process of controlling the position of flat parts with asymmetry of surfaces by air jets / S. I. Pundyk. Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2024. – №3 (337). – P. 285-287.

# OPTIMIZING SAMPLING AND CONNECTION PARAMETERS OF PROBABILISTIC ROADMAP PATH PLANNER IN PATH LENGTH MINIMIZATION FOR ROBOTIC MANIPULATION WITHIN OBSTACLE-DENSE ENVIRONMENTS

**Romanuke V.V.**
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Ukraine

**Abstract.** A problem of tuning effectively the sampling density and maximum connection distance of the probabilistic roadmap path planner is considered. These two parameters can be coupled owing to their selection depends on the roadmap size, especially within obstacle-dense environments. The sampling and connection parameters are iteratively optimized, where the iterative procedure is initiated with two additional factors serving for map-dependent corrections of connectivity and sampling nonlinear adaptivity. The optimal path and its minimal length are random objects, so they are approximated better by running the planner for multiple rounds, shortening the path more effectively in terms of statistical stability.

**Keywords:** roadmap path planner, obstacles, path length, sampling density, connection distance.

**Introduction.** Probabilistic roadmap methods (PRMs) have become a fundamental tool in robotic path planning applied to navigate robotic manipulators within environments of complex geometry [1]. Originally introduced as a sampling-based approach to address the limitations of deterministic planners, PRMs construct a graph representation of the obstacle-free space by randomly sampling collision-free configurations and connecting nearby nodes according to a predefined distance criterion [2]. Once constructed, such a roadmap enables efficient path queries between arbitrary start and goal configurations [3].

**PRM performance sensitivity.** Despite their conceptual simplicity and good practical applicability, the performance of PRMs is highly sensitive to the selection of key parameters of the probabilistic roadmap path planner (PRMPP) [4]. Such key parameters are the number of sampled nodes (denoted by $N$ for further consideration) and the maximum connection distance (denoted by $d$) used to establish edges in the roadmap. These parameters jointly determine the structural properties of the resulting graph, including its connectivity, sparsity, and the quality of feasible paths [2, 5]. Within obstacle-dense environments, the PRMPP sensitivity becomes especially clearer: insufficient sampling or overly restrictive connection radii may lead to disconnected graphs and infeasible queries, whereas excessive connectivity can increase computational time without guaranteeing improvements in path length [3].

**PRMPP parameter-tuning question.** A central challenge, therefore, lies in identifying parameter configurations that ensure both feasibility and high-quality solutions. While classical studies have established probabilistic completeness and asymptotic optimality properties of sampling-based PRMPPs [2], much less attention has been paid to the practical problem of parameter tuning for finite-size roadmaps modeling environments with densely emerged obstacles. In such settings, the relationship between sampling density and maximum connection distance exhibits a nontrivial trade-off, which directly impacts the length and robustness of the computed paths [6]. The reason is in the core idea of the PRMPP, which randomly samples nodes in the robot-and-environment space, where the sampling is controlled by $N$ [2, 4]. The more nodes there are, the higher the probability of finding an acceptable path. The PRMPP connects nearby nodes if the straight-line path between them is collision-free, which is controlled by $d$ [1, 5, 6]. Larger distance implies farther connectivity, but more collision checks [2]. Thus, the path feasibility versus path quality trade-off takes its place: too few nodes may lead to an empty path (no solution found), whereas too large $N$ giving better coverage lingers solution process; too small $d$ may lead to the roadmap is disconnected, whereas too large $d$ leads to longer edges that may intersect obstacles [3, 6].

**Goal.** Given a path length minimization problem in the PRMPP for robotic manipulation within obstacle-dense environments, the goal is to develop a method of tuning parameters $N$ and $d$ so that the resulting path would be the shortest possible.

**Optimizing the PRMPP sampling and connection parameters.** The PRMPP is essentially

a randomized approximation of the connectivity structure of free space, where parameters $N$ and $d$ are actually controlling graph density, connectivity probability, and approximation quality. The latter is factually the path length as a function $L = L(N, d, r, \rho)$ of sampling and connection parameters, along with a robot radius $r$ and a pseudorandom number generator (PRNG) state $\rho$ (seed). Parameters $N$ and $d$ should scale with the roadmap geometry. Together they form a random geometric graph of a definite sampling density by $N$ and a graph connectivity radius by $d$. Let the roadmap be a rectangle of size $H \times W$, on which a set of rectangular obstacles is embedded. Then the relative scale (characteristic size) of the roadmap is $s = \sqrt{H^2 + W^2}$, where $s$ is going to be used as a normalization factor. The function $L = L(N, d, r, \rho)$ is to be minimized given the roadmap and its obstacles. While it is being minimized, the key insight is that parameters $N$ and $d$ are bonded: large $N$ implies that smaller $d$ can be used, and small $N$ requires larger $d$. The impact of robot radius is far less: it affects narrow passages, but less than the roadmap size. In practice, a larger robot radius implies that larger $d$ or larger $N$ is needed (or both). Since the path length depends on $\rho$ and $L = L(N, d, r)$ is factually a random variable, the path itself as a $2 \times M$ matrix $P = [p_{ik}]_{2\times M}$ is a random point in space $R^{2\times M}$, where $M$ is the number of path points (nodes), $p_{1k}$ and $p_{2k}$ are horizontal and vertical coordinates, $k = 1, M$, $[p_{11}\ p_{21}]$ and $[p_{1M}\ p_{2M}]$ are the start and end locations, respectively. Moreover, number $M$ depends on PRNG state $\rho$ as well. Therefore, the path length minimization problem is a stochastic minimization problem of finding a positive integer $N^*$ and a positive real value $d^*$ such that the length minimum expected value is reached:

$$L(N^*, d^*, r) = \mathbb{E}\left(\min_{N, d} L(N, d, r)\right) = L_* \text{ (corresponding to an optimal path } \mathbf{P}^*). \quad (1)$$

Obviously, problem (1) cannot be solved exactly. To solve it approximately, an iterative procedure is initiated by initial values $N = N_1$ and $d = d_1$. The PRMPP connectivity condition is

$$d = \alpha s\sqrt{N^{-1} \ln N} \quad (2)$$

by some $\alpha > 0$ (an unintentional pun is that this equation connects $d$ and $N$ as well), where $\alpha$ is a map-dependent correction factor based on obstacle density [6]. Obstacle-dense environments require lower values of $\alpha$ due to such values corresponding to more-noded paths that allow them to avoid multiple obstacles more effectively. Function (2) is decreasing, and it changes nonlinearly: there are rapid changes for small $N$ and slow changes for large $N$. So, log-scale stepping matches this perfectly. Thus, at the first iteration, a good start is to take

$$N_1 = \psi[10 \ln(HW)] \quad (3)$$

and continue until the path length changes insignificantly by

$$d_u = \alpha s\sqrt{N_u^{-1} \ln N_u},\ N_{u+1} = \psi(\beta N_u),$$
$$u = 1, 2, 3, \ldots (\beta \text{ is the adaptive step factor, } \beta > 1), \quad (4)$$

where function $\psi(x)$ rounds $x$ to the nearest integer, and $\beta$ is tuned similarly to that of $\alpha$. Nevertheless, setting $\alpha = 1.25$ and $\beta = 1.05$ is practically reasonable. By such values, for instance, the $64 \times 64$ roadmap approximates solutions with 10 (Fig. 1), 20 (Fig. 2), 40 (Fig. 3), and 80 (Fig. 4) medium-rectangular obstacles that are no farther than 1.5 to 9.5 % away from the solution of (1). If the PRMPP is run for 100 rounds (Fig. 4), the path length is 0.15 % away from the minimum (Fig. 5).

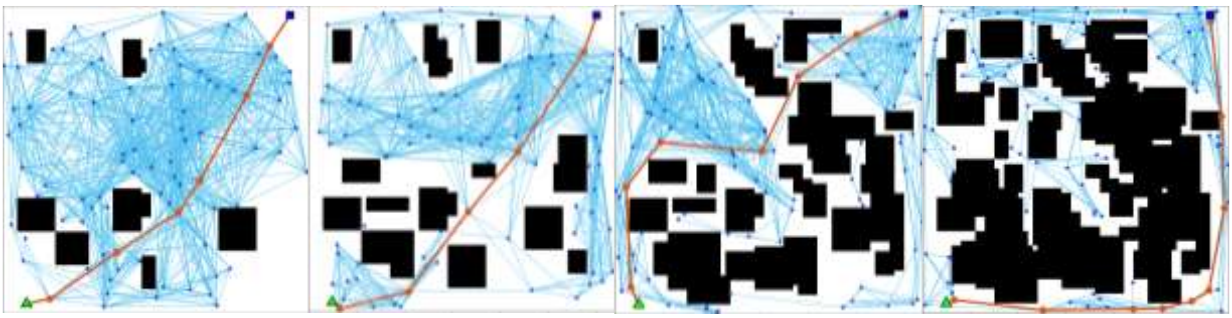


Fig. 1. 10 obstacles Fig. 2. 20 obstacles Fig. 3. 40 obstacles Fig. 4. 80 obstacles

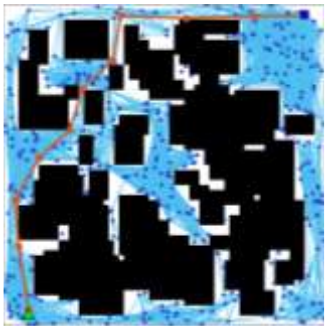


Fig. 5. A far better approximation of the optimal path for the example with 80 obstacles (Fig. 4)

The size of obstacles, clearly, heavily influences the solution of (1). Relatively smaller obstacles (with respect to the roadmap size) are easier to avoid: e. g., the approximately optimal path in the $256 \times 256$ roadmap (Fig. 6) is of only 11 nodes; as the size of the obstacles has doubled, the path consists of 14 nodes (Fig. 7). Robot radius has its own impact on the path structure and path length minimum. For instance, if the robot radius in the example in Fig. 6 is four times increased (i. e., it is 4x), the path becomes about 10.28 % longer (Fig. 8). However, numerical simulations have revealed that adjusting $\alpha$ and $\beta$ cannot drastically shorten the path. Running the PRMPP for multiple rounds does shorten it as the value (1) is more effectively approximated in terms of statistical stability [2, 5, 6].

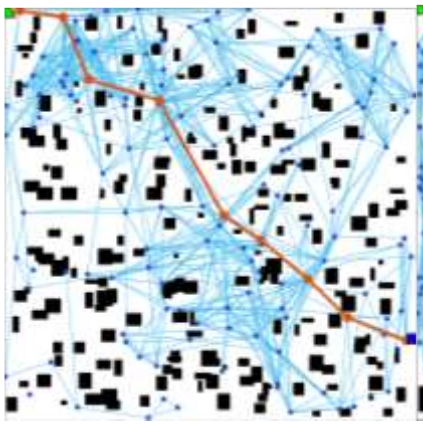


Fig. 6. The path is of 11 nodes

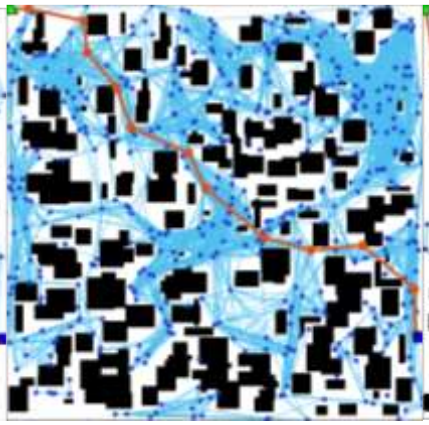


Fig. 7. The path is of 14 nodes

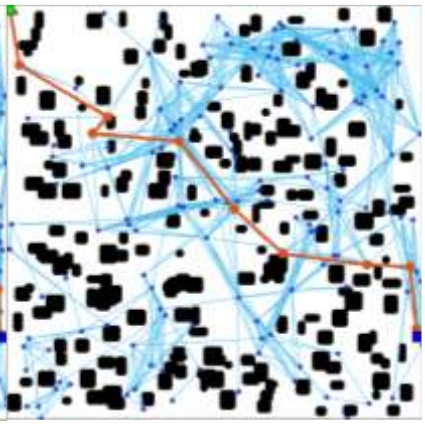


Fig. 8. Robot radius is 4x

**Conclusion.** The PRMPP is used whenever a collision-free path in a complex environment needs to be computed, especially when the environment is mostly static and can be explored in advance. It is widely used for robots that move in structured indoor spaces for delivery, parking maneuvers, and low-speed navigation. The PRMPP main parameters are the sampling density and maximum connection distance, which are interconnected via (2) and are optimized iteratively by (3), (4). The solution converges to the optimal path length (1) as the PRMPP is run for multiple rounds.

## References


1. Zhang L. *et al.* (2025). Motion planning for robotics: A review for sampling-based planners. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, Vol. 5, Iss. 1, Article no. 100207. https://doi.org/10.1016/ j.birob.2024.100207
2. LaValle S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/ CBO9780511546877
3. Amato N. M. and Wu Y. (1996). A randomized roadmap method for path and manipulation planning. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1. Minneapolis, MN, USA, pp. 113–120. https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.503582
4. Wang Y. *et al.* (2026). Improved PRM algorithm based on dynamic partitioning and adaptive sampling. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, Vol. 6, Iss. 1, Article no. 100283. https://doi.org/ 10.1016/j.birob.2026.100283
5. Romanuke V. V. (2023). Pruning minimum spanning trees and cutting longest edges to connect a given number of nodes by minimizing total edge length. *Information and Telecommunication Sciences*, Vol. 14, No. 2, pp. 40–52. https://doi.org/10.20535/2411-2976.22023.40-52
6. Romanuke V. V. (2023). Building minimum spanning trees under maximum edge length constraint. *Information Technology and Management Science*, Vol. 26, pp. 17–26. https://itms-journals.rtu.lv/ article/view/itms-2023-0003

# INFORMATION TECHNOLOGY FOR WEATHER-INVARIANT UAV VISUAL LOCALIZATION VIA A TOPOLOGY-PRESERVING WEATHER AUGMENTATION METHOD

**Vozniak V., Barmak O.**
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

**Abstract**. Autonomous flight of unmanned aerial vehicles (UAVs) in environments where satellite positioning is unavailable depends on visual place recognition, the accuracy of which drops sharply when the scene is altered by fog, snow, or transition to night. The paper introduces an information technology, called the topology-preserving weather augmentation (TPWA) method, in which a generative image-to-image model is used to synthesise additional meteorological domains while the topology of building footprints is preserved. The pipeline is organised as a Generate–Verify–Filter loop with a fail-closed control rule that rejects any synthetic frame violating one of three independent geometric criteria: mask overlap (IoU), edge similarity (SSIM on gradient maps), and a perceptual weather-shift threshold based on LPIPS. The accepted samples are used to fine-tune a YOLO11 segmentation network whose internal features form a building-aware scene descriptor. Experiments confirm that TPWA training raises mean Average Precision in the fog domain from 0.397 to 0.815, and improves Recall@1 on the urban segment of the VPAIR benchmark by a factor of 1.4–2.7 compared with MixVPR and CosPlace baselines under adverse weather.

**Keywords**: Unmanned Aerial Vehicle, GNSS-denied Navigation, Visual Place Recognition, Semantic Segmentation, YOLO, Generative Image-to-Image Model, Domain Shift, Topology-Preserving Augmentation.

**Introduction**. Reliable global positioning of UAVs in airspace where the global navigation satellite system is unavailable, jammed or spoofed is among the most pressing applied tasks of modern intelligent robotics. When satellite signals are denied, visual place recognition (VPR), which matches an onboard camera frame against a georeferenced database of orthophoto tiles, becomes the principal alternative for global localisation [1, 9]. Recent results show that descriptors derived from semantic segmentation of buildings with the YOLO11 architecture provide a compact and discriminative representation for cross-view matching [2, 3], and that semantic anchoring on stable scene elements is generally more robust than holistic appearance-based descriptors in dynamic environments [10, 11, 12, 14]. However, real-flight deployment is still limited by domain shift: standard photometric augmentations cannot reproduce the joint effect of contrast loss, depth-dependent light scattering and altered colour temperature, while modern generative models, used without structural control, distort building outlines and introduce label noise into the annotation set [4, 5, 13].

**The purpose of the work** is to design an information technology for the synthetic construction of meteorological domains that simultaneously preserves the topological integrity of building annotations and provides a sufficient level of photometric perturbation, in order to train a UAV scene descriptor that is robust to atmospheric and illumination domain shift.

**Formulation of the problem**. During flight, the appearance of an urban scene varies substantially with weather and time of day, whereas the satellite reference base is acquired under clean conditions and is essentially static. Augmentation with parametric photometric distortions does not capture the spatial structure of fog or the colour temperature of snow cover, while unconstrained image-to-image translation may shift roof contours, duplicate or remove buildings, and break the alignment with pixel-level masks. The task, therefore, reduces to constructing a guided procedure that, for every input image, either produces a synthetic weather variant whose geometry is verifiably consistent with the original mask, or rejects the candidate altogether so that no ambiguous labels enter the training set.

**Solving the problem**. The proposed topology-preserving weather augmentation (TPWA) method is implemented as a closed iterative "Generate–Verify–Filter" loop, the overall scheme of which is shown in Fig. 1. For every original frame and every target domain $w \in \{\text{fog, snow, night}\}$, a guided generative operator G synthesises a candidate $I_w$ using a fixed system prompt that forbids

any alteration of geometry, scene layout or building footprints, and a domain-specific user prompt that describes the meteorological style. In the reference implementation, G is realised through the Gemini 2.5 Flash Image model in image-to-image mode with fixed sampling parameters, which guarantees reproducibility of the data-curation step.

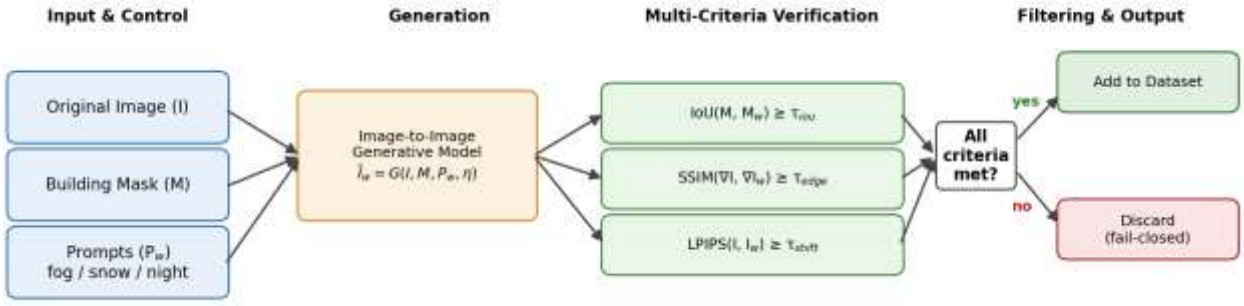



Fig. 1. General scheme of the topology-preserving weather augmentation method

Each candidate is evaluated against three independent acceptance criteria (Fig. 1): mask overlap IoU(M, Seg($I_w$))$\geq\tau_{iou}$ is enforced against a frozen reference YOLO11 segmenter trained on the original (clean) split, so that the verifier itself never sees the synthetic samples; edge consistency SSIM($\nabla I$, $\nabla I_w$)$\geq\tau_{edge}$ is computed on Sobel gradient maps and detects micro-deformations of building lines that the IoU criterion would miss; the strength of the photometric shift LPIPS(I, $I_w$)$\geq\tau_{shift}$ bounds the augmentation from below and rejects frames almost identical to the original. In all experiments $\tau_{iou} = 0.85$, $\tau_{edge} = 0.7$ and $\tau_{shift} = 0.1$. A frame failing any of the three checks is discarded under the fail-closed rule, and the combined score $s_{iou} + s_{edge}$ ranks the surviving candidates and selects the one that best preserves both the global topology and the high-frequency contour information.

The accepted dataset (baseline + fog + snow + night) is then used to fine-tune YOLO11 with a composite loss combining segmentation (BCE + Dice), bounding-box (CIoU), distribution focal and classification terms; the train/test split is performed before augmentation, so a weather-augmented variant of a test frame is never observed during training. After fine-tuning, the output of the last convolutional layer of the YOLO backbone, followed by global pooling, serves as a compact scene descriptor; a query frame from the UAV is matched to the satellite tile that minimises the $L_2$ distance in this descriptor space.

Quantitative experiments confirm the practical effect of geometric control. The underlying building-segmentation dataset comprises 9665 high-resolution aerial images covering diverse urban landscapes, all resampled to 640×640 pixels. Training on the merged topology-verified set raises mean Average Precision (mAP@0.5) in the fog domain from 0.397 (clean-only baseline) to 0.815, while keeping mAP@0.5 in the original domain at 0.824. The localisation evaluation on the urban segment of the VPAIR benchmark [8], with a fixed satellite database and weather perturbations applied only to UAV queries, is summarised in Table 1.

Table 1

**Recall@1 (R = 3 frames) on the urban subset of VPAIR**

| Method | Original | Fog | Night | Snow |
|---|---|---|---|---|
| CosPlace [6] | 0.140 | 0.045 | 0.051 | 0.056 |
| MixVPR [7] | 0.210 | 0.074 | 0.085 | 0.089 |
| YOLO11 (no TPWA) | 0.181 | 0.079 | 0.083 | 0.091 |
| **YOLO11 + TPWA (ours)** | **0.195** | **0.121** | **0.139** | **0.125** |

**Conclusion**. The reported study supports the hypothesis that, for UAV visual localisation in GNSS-denied scenarios, the topological integrity of semantic landmarks should be prioritised over the photorealism of synthetic transformations. The topology-preserving weather augmentation method organises the construction of weather domains as a controlled data-curation process in which every synthetic image is checked against explicit geometric and perceptual criteria, and any frame that does not satisfy them is rejected by the fail-closed rule. Trained on the resulting multi-

domain set, a single YOLO11 model exhibits stable accuracy across all four domains and noticeably improves cross-view matching with a static satellite database under fog, snow and night-time illumination. The cloud generative module is used only at the offline data-preparation stage, so the runtime localisation pipeline remains fully onboard. Future work concerns adapting the method to non-urban landscapes and integrating sequence-level re-ranking to further improve absolute Recall@1 in the worst-case domains.

## References


1. Schubert, S., Neubert, P., Garg, S., Milford, M., Fischer, T.: Visual Place Recognition: A Tutorial. IEEE Robotics & Automation Magazine, 31(3), pp. 139–153, (2024).
2. Vozniak, V., Barmak, O., Krak, I.: Method for matching satellite and UAV images for visual place recognition with cross-view color normalization. Radioelectronic and Computer Systems, 2025(3), pp. 150–165, (2025).
3. Ultralytics: YOLO11 Models Documentation. https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/, (2024).
4. Yang, H., Carballo, A., Zhang, Y., Takeda, K.: Framework for Generation and Removal of Multiple Types of Adverse Weather from Driving Scene Images. Sensors, 23(3), 1548, (2023).
5. Shen, F. et al.: W-ControlUDA: Weather-Controllable Diffusion-assisted Unsupervised Domain Adaptation for Semantic Segmentation. IEEE Robotics and Automation Letters, 10(5), pp. 4204–4211, (2025).
6. Berton, G., Masone, C., Caputo, B.: Rethinking Visual Geo-Localization for Large-Scale Applications. In: Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4878–4888, (2022).
7. Ali-Bey, A., Chaib-Draa, B., Giguère, P.: MixVPR: Feature Mixing for Visual Place Recognition. In: Proc. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), pp. 2997–3006, (2023).
8. Schleiss, M., Rouatbi, F., Cremers, D.: VPAIR – Aerial Visual Place Recognition and Localization in Large-scale Outdoor Environments. arXiv preprint arXiv:2205.11567, (2022).
9. Zhang, X., Wang, L., Su, Y.: Visual place recognition: A survey from deep learning perspective. Pattern Recognition, 113, 107760, (2021).
10. Yin, P. et al.: General Place Recognition Survey: Toward Real-World Autonomy. IEEE Transactions on Robotics, 41, pp. 3019–3038, (2025).
11. Mao, L., Soussan, R., Coltin, B., Smith, T., Biswas, J.: Semantic Masking and Visual Feature Matching for Robust Localization. In: International Conference on Space Robotics (iSpaRo), pp. 1–7, (2024).
12. Tian, Y. et al.: Discriminative and semantic feature selection for place recognition towards dynamic environments. Pattern Recognition Letters, 153, pp. 75–82, (2022).
13. Li, B. et al.: Semantic-Guided Generative Image Augmentation Method with Diffusion Models for Image Classification. Proc. AAAI Conference on Artificial Intelligence, 38(4), pp. 3018–3027, (2024).
14. Zaffar, M. et al.: VPR-Bench: An Open-Source Visual Place Recognition Evaluation Framework with Quantifiable Viewpoint and Appearance Change. International Journal of Computer Vision, 129(7), pp. 2136–2174, (2021).

# СЕМАНТИЧНІ ОРІЄНТИРИ ДЛЯ GPS-DENIED ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАЛИХ БПЛА НА ОСНОВІ OPEN-VOCABULARY ДЕТЕКЦІЇ

**Андрюшко В.Б., Клакович Л.М.**
Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна

**Анотація.** У GPS-denied середовищі автономне позиціонування малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) обмежується накопиченням дрейфу у візуально-інерціальних системах та нестійкістю міжпольотного повторного розпізнавання місця. У роботі запропоновано підхід до повторної ідентифікації семантичних орієнтирів, заснований на open-vocabulary детекції об’єктів та їх дескрипторному зіставленні між польотами. На відміну від class-agnostic методів сегментації, запропонована система використовує семантично стабільні об’єкти як довготривалі орієнтири, що зменшує кількість хибних відповідностей, спричинених текстурними регіонами. Запропонована архітектура передбачає поєднання open-vocabulary детектора Grounding DINO, двох незалежних дескрипторних каналів (CLIP та DINOv2) і механізму просторового голосування геометрично узгоджених відповідностей. На синтетичних даних AirSim-NH у сценаріях висотної та погодної розбіжності медіанна горизонтальна помилка локалізації за відповідного вибору дескриптора та механізму консенсусу досягає метрового рівня та істотно перевершує базову реалізацію на основі SAM + CLIP. Ablation-аналіз показує, що жодна окрема конфігурація не є оптимальною в усіх сценаріях, а найкращу узагальнювальну здатність забезпечує двоканальна архітектура, яка поєднує покриття CLIP-каналу та стійкість DINOv2-каналу до змін зовнішнього вигляду сцени. Попередні інженерні оцінки свідчать про сумісність запропонованої архітектури з бортовим розгортанням на платформі Jetson Orin NX.

**Ключові слова:** малий БПЛА, GPS-denied позиціонування, повторна ідентифікація об'єктів, open-vocabulary детекція, Grounding DINO, Teach-and-Repeat, DINOv2, CLIP, бортовий комп'ютерний зір.

# SEMANTIC LANDMARKS FOR GPS-DENIED POSITIONING OF SMALL UAVs BASED ON OPEN-VOCABULARY DETECTION

**Andriushko V., Klakovych L.**
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

**Abstract.** In GPS-denied environments, the autonomous positioning of small unmanned aerial vehicles (UAVs) is limited by drift accumulation in visual-inertial odometry (VIO) systems and by the instability of cross-flight place re-recognition. This work proposes an approach to semantic landmark re-identification based on open-vocabulary object detection and descriptor-level matching between flights. Unlike class-agnostic segmentation methods, the proposed system uses semantically stable objects as long-term landmarks, which reduces the number of false matches caused by textural regions. The architecture combines the Grounding DINO open-vocabulary detector, two independent descriptor channels (CLIP and DINOv2), and a spatial voting mechanism over geometrically consistent matches. On synthetic AirSim-NH data, under altitude- and weather-divergence scenarios, the system demonstrates a median horizontal localisation error of about one metre and substantially outperforms the SAM + CLIP baseline. The ablation study shows that no single configuration is optimal across all scenarios; the best generalisation is provided by a dual-channel architecture that combines the coverage of the CLIP channel with the robustness of the DINOv2 channel to changes in scene appearance. Engineering estimates indicate the feasibility of onboard deployment on the Jetson Orin NX platform.

**Keywords:** small UAV, GPS-denied positioning, cross-flight object re-identification, open-vocabulary detection, Grounding DINO, Teach-and-Repeat, DINOv2, CLIP, onboard computer vision.

**Вступ.** Автономне позиціонування малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у GPS-denied середовищі ускладнюється накопиченням дрейфу у візуально-інерціальних системах локалізації [1]. Одним із поширених способів його компенсації є повторне розпізнавання раніше відвіданих місць. У парадигмі Teach-and-Repeat візуальна інформація,

накопичена під час teach-сесії, використовується як карта орієнтирів для наступних польотів [2].

Більшість сучасних підходів visual place recognition базуються на глобальних або patch-рівневих ознаках кадру, які чутливі до змін висоти, освітлення та погодних умов. Альтернативний підхід полягає у використанні семантично стабільних об'єктів сцени як довготривалих орієнтирів.

Ефективність такого підходу залежить від якості генерації об'єктних кандидатів. У class-agnostic схемах сегментації, зокрема при використанні SAM [3] у режимі everything, значна частина регіонів відповідає текстурним елементам сцени, що призводить до великої кількості хибних відповідностей навіть при використанні CLIP-дескрипторів [4].

У роботі запропоновано підхід до міжпольотної повторної ідентифікації об'єктів на основі open-vocabulary детекції. Система поєднує Grounding DINO [5], дескрипторні моделі CLIP і DINOv2 [6], а також механізм просторового голосування геометрично узгоджених відповідностей для позиціонування малих БПЛА у GPS-denied середовищі.

**Постановка задачі.** Прототипна система на основі SAM [3] у режимі everything та CLIP-дескрипторів [4] демонструє нестійкість у сценаріях зміни висоти та погодних умов. Основною причиною деградації є class-agnostic генерація регіонів: значна частина сегментів відповідає текстурним елементам сцени, які не є семантично стабільними орієнтирами. Це призводить до великої кількості хибних відповідностей при міжпольотному зіставленні.

У роботі розглядається задача формування semantic landmarks на основі семантично значущих об'єктів сцени та побудови стійкої системи їх повторної ідентифікації у GPS-denied середовищі.

**Мета роботи.** Дослідити використання open-vocabulary детекції для формування семантичних орієнтирів та побудувати систему міжпольотної повторної ідентифікації об'єктів, стійку до змін висоти та погодних умов у GPS-denied середовищі.

**Вирішення проблеми.** Запропонована система виконує міжпольотну повторну ідентифікацію семантичних орієнтирів у чотири етапи. На першому етапі open-vocabulary детектор Grounding DINO [5] виявляє семантично значущі об'єкти сцени. Далі кожен об'єкт описується дескрипторами CLIP [4] або DINOv2 [6], які зберігаються у карті орієнтирів teach-сесії. Для query-кадра виконується пошук взаємно узгоджених відповідностей між об'єктами query- та teach-сесій.

Локалізація виконується не за глобальною схожістю кадрів, а за геометрично узгодженими відповідностями між об'єктами. Кінцева оцінка позиції БПЛА визначається механізмом просторового голосування з відкиданням конкурентних гіпотез локалізації.

**Експериментальне оцінювання.** Оцінювання виконано у симуляторі AirSim-NH [7] для траєкторії 50 × 50 м на висоті 30 м. Teach-сесія містила 162 кадри; тестування проводилося у трьох сценаріях: базовому, зі зміною висоти (+20 м) та за умов туману (0.30).

Результати ablation-аналізу наведено у табл. 1. Перехід від class-agnostic сегментації SAM до open-vocabulary детекції Grounding DINO зменшує помилку локалізації у всіх сценаріях. Додавання механізму просторового голосування істотно підвищує точність у сценарії висотної розбіжності за рахунок зменшення покриття – частки query-кадрів, для яких система формує оцінку позиції. Використання DINOv2 забезпечує найкращу стійкість до погодних змін. Загалом жодна окрема конфігурація не є оптимальною в усіх сценаріях, що мотивує використання двоканальної архітектури.

Таблиця 1

**Порівняння конфігурацій на синтетичних даних AirSim-NH (медіана горизонтальної помилки, м)**

| конфігурація | canonical | висота +20 м | туман 0.30 |
|---|---|---|---|
| A0: SAM + CLIP + MAD (baseline) | 0.72 | 18.22 | 9.60 |
| A1: GDino + CLIP + MAD | 0.63 | 13.11 | 3.00 |
| A2: A1 + DBSCAN-голосування | 0.64 | 0.46 | 0.72 |
| A3: GDino + DINOv2 + MAD | 0.50 | 12.62 | 1.01 |

**Ключове спостереження.** Жодна окрема конфігурація не забезпечує найкращі результати в усіх тестових сценаріях. CLIP-канал демонструє високе покриття у базовому режимі, механізм просторового голосування суттєво підвищує точність при зміні висоти, а DINOv2 забезпечує найбільшу стійкість до погодних змін. Це мотивує використання двоканальної архітектури, у якій спільний етап open-vocabulary детекції поєднується з незалежними CLIP- та DINOv2-каналами локалізації.

**Висновок.** У роботі запропоновано підхід до міжпольотної повторної ідентифікації семантичних орієнтирів для позиціонування малих БПЛА у GPS-denied середовищі. Показано, що використання open-vocabulary детекції дозволяє зменшити кількість хибних відповідностей, характерних для class-agnostic сегментації. На синтетичних даних AirSim-NH у найкращих конфігураціях запропонована система досягає медіанної помилки локалізації порядку одного метра у сценаріях висотної та погодної розбіжності. Ablation-аналіз показав, що найбільший потенціал узагальнення має двоканальна архітектура, яка поєднує високе покриття CLIP-каналу та стійкість DINOv2 до змін зовнішнього вигляду сцени. Подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальну валідацію системи на реальних польотах та оцінювання бортової продуктивності на платформі Jetson Orin NX.

## Список використаних джерел


1. Delmerico, J., Scaramuzza, D. (2018). A benchmark comparison of monocular visual-inertial odometry algorithms for flying robots. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2502–2509. doi: 10.1109/ICRA.2018.8460664.
2. Furgale, P., Barfoot, T. D. (2010). Visual teach and repeat for long-range rover autonomy. *Journal of Field Robotics*, 27(5), pp. 534–560. doi: 10.1002/rob.20342.
3. Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N. et al. (2023). Segment Anything. *Proc. IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 4015–4026. doi: 10.1109/ICCV51070.2023.00371.
4. Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C. et al. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. *Proc. International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR*, vol. 139, pp. 8748–8763. URL: https://proceedings.mlr.press/v139/radford21a.html
5. Liu, S., Zeng, Z., Ren, T. et al. (2023). Grounding DINO: Marrying DINO with grounded pre-training for open-set object detection. *arXiv preprint* arXiv:2303.05499. URL: https://arxiv.org/abs/2303.05499
6. Oquab, M., Darcet, T., Moutakanni, T. et al. (2024). DINOv2: Learning robust visual features without supervision. *Transactions on Machine Learning Research*. URL: https://openreview.net/forum?id=a68SUt6zFt
7. Shah, S., Dey, D., Lovett, C., Kapoor, A. (2017). AirSim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles. *Field and Service Robotics*, pp. 621–635. doi: 10.1007/978-3-319-67361-5_40.

# ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ІТ-СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВИРОБНИЧИХ ЗАВДАНЬ

**Благодир О.В., Надопта Т.А.**
Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто архітектуру інтегрованої ІТ-системи контролю виробничих завдань для підприємств легкої промисловості. Новизна запропонованого рішення полягає в об'єднанні підсистем управління розкроєм матеріалів (MES) та обліку матеріальних запасів (WMS) в єдиній системі з двостороннім автоматизованим обміном даними. Запропонована архітектура охоплює повний цикл контролю, від отримання виробничого замовлення через CRM-модуль до формування управлінської звітності в BI-системі. Зворотні зв'язки від BI до ERP та SCM-підсистем забезпечують замкнений контур управління. Ключовою інтеграцією є пряма синхронізація між MES-системою управління розкроєм та WMS-системою обліку запасів, що усуває інформаційний розрив між підрозділами.

**Ключові слова:** інтегрована ІТ-система, контроль виробничих завдань, управління запасами, розкрій матеріалів, легка промисловість.

# USE OF INTEGRATED IT SYSTEMS FOR PRODUCTION TASK CONTROL

**Blahodyr O.V., Nadopta T.A.**
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

**Abstract.** This paper presents the architecture of an integrated IT system for production task control in light industry enterprises. The novelty of the proposed solution lies in combining the cutting process control subsystem (MES) and the material inventory management subsystem (WMS) within a single system with bidirectional automated data exchange. The proposed architecture covers the full control cycle: from receiving a production order via the CRM module to generating management reports in the BI system. Feedback loops from BI to ERP and SCM subsystems ensure a closed-loop management circuit. The key integration is direct synchronization between the MES cutting management system and the WMS inventory system, which eliminates the information gap between departments.

**Keywords:** integrated IT system, production task control, inventory management, material cutting, light industry.

**Вступ.** Підприємства легкої промисловості функціонують в умовах жорсткої конкуренції, де своєчасне виконання виробничих завдань та ефективне управління матеріальними ресурсами безпосередньо визначають конкурентоспроможність. Питома вага матеріальних витрат у собівартості продукції легкої промисловості сягає 60-75%, що робить точний облік і контроль витрат матеріалів дуже важливими завданнями [1]. Попри широке розповсюдження окремих інформаційних систем - ERP, MES, WMS - більшість підприємств галузі досі використовують їх як ізольовані інструменти без автоматизованого обміну даними між ними [2]. Це породжує інформаційні розриви, дублювання введення даних та затримки у прийнятті управлінських рішень, що негативно впливає на виконання виробничих завдань та точність складського обліку.

**Мета роботи.** Розробити архітектуру інтегрованої ІТ-системи контролю виробничих завдань, що забезпечує наскрізний автоматизований обмін даними між підсистемами управління розкроєм матеріалів та обліку матеріальних запасів на підприємствах легкої промисловості.

**Постановка проблеми.** Аналіз інформаційних потоків на підприємствах легкої промисловості виявляє характерний структурний розрив між підсистемою управління розкроєм (MES) та підсистемою обліку матеріальних запасів (WMS). На практиці фактичні витрати матеріалу, зафіксовані при розкрої, не передаються автоматично до складської системи, оператор складу вносить дані вручну із затримкою від кількох годин до доби. Це призводить до невідповідності облікових і фактичних залишків, некоректного розрахунку ROP та запізнілих сигналів поповнення запасів, що спричиняє або наднормативні запаси, або

дефіцит матеріалів у критичні моменти виробничого циклу [3]. Паралельно відсутність єдиного контуру контролю виробничих завдань унеможливлює автоматичне відображення відхилень між плановими показниками ERP та фактичним виконанням MES у складській системі та інструментах звітності [4]. Існуючі комплексні ERP-рішення, навіть в контексті концепції Industry 4.0, вирішують цю проблему лише частково, оскільки є надто дорогими та не враховують специфіку технологічних процесів легкої промисловості [5].

**Основна частина.** Запропонована архітектура інтегрованої IT-системи контролю виробничих завдань охоплює повний виробничий цикл та включає сім взаємопов'язаних підсистем (рис. 1).

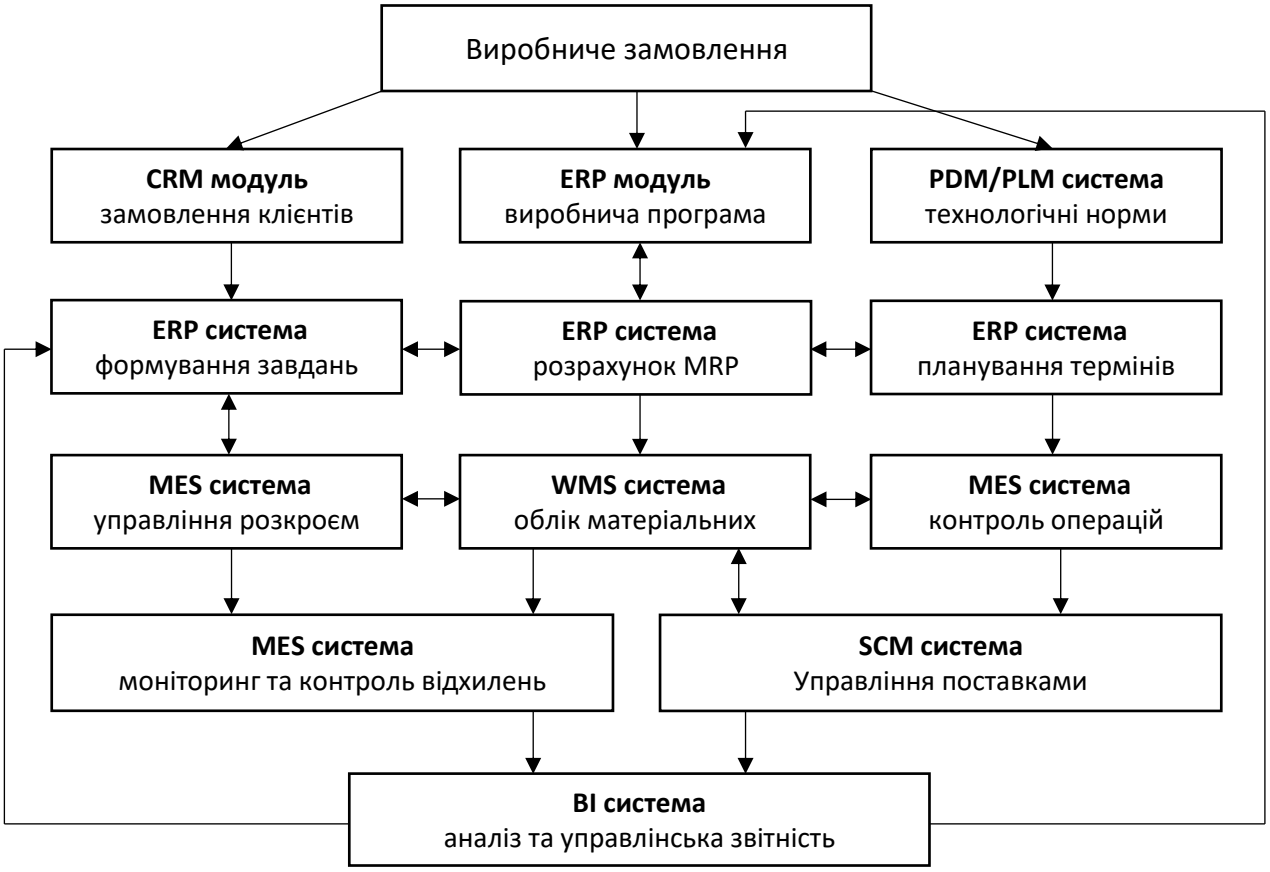



Рис. 1. Схема взаємодії модулів інтегрованої IT-системи контролю виробничих завдань

Вхідною точкою є виробниче замовлення, яке одночасно ініціює три паралельні інформаційні потоки: реєстрацію замовлення в CRM-модулі, формування виробничої програми в ERP-системі та завантаження технологічних нормативів витрат матеріалів з PDM/PLM-системи.

На рівні планування ERP-система виконує три взаємопов'язані функції: формування виробничих завдань з розподілом по цехах, розрахунок потреби в матеріалах за методом MRP та планування термінів виконання. Двосторонній зв'язок між модулями дозволяє автоматично коригувати терміни завдання при зміні розрахункової потреби в матеріалах або при виявленні браку розкрою.

Ключовою новизною архітектури є інтеграція на рівні виконання між MES-системою управління розкроєм та WMS-системою обліку матеріальних запасів. Механізм інтеграції реалізований як синхронізація на основі подій, де кожна зафіксована MES-системою операція розкрою автоматично генерує подію списання, яка передається до WMS-системи та ініціює оновлення складських залишків без участі оператора. Відхилення фактичних витрат матеріалу від нормативних ($\delta$ = факт - норма) фіксується автоматично і передається до модуля моніторингу [6]. У зворотному напрямку WMS-система передає до MES актуальні

дані про залишки матеріалів, що дозволяє формувати завдання на розкрій лише за наявності достатньої кількості матеріалу на складі, уникаючи простоїв розкрійного цеху.

Третя підсистема рівня виконання - MES-система контролю виробничих операцій відстежує фактичний хід виконання завдань у швейному цеху, фіксує статус кожної операції та передає дані до MES-системи моніторингу. WMS-система також пов'язана з SCM-системою управління поставками: при досягненні рівня ROP, розрахованого на основі поточних залишків та нормативів витрат, автоматично формується сигнал необхідності поповнення запасів, який передається до SCM для ініціювання замовлення постачальнику.

MES-система моніторингу інтегрує дані з усіх підсистем рівня виконання та формує єдину картину стану виробничих завдань: відсоток виконання, відхилення від плану по термінах і матеріалах, поточний статус підрозділів. SCM-система управляє взаємодією з постачальниками, отримує сигнали ROP від WMS та передає до неї дані про очікувані надходження. Обидві підсистеми передають агреговані дані до BI-системи для формування управлінської звітності.

Замкненість контуру управління забезпечується двома зворотними зв'язками від BI-системи. Перший зворотний зв'язок передає до ERP-системи зведені дані про фактичне виконання завдань і відхилення, що дозволяє коригувати виробничу програму на наступні планові періоди з урахуванням реальної продуктивності підрозділів. Другий зворотний зв'язок спрямований до ERP-модуля формування завдань і забезпечує оперативне перепланування у разі суттєвих відхилень від поточного плану. Таким чином, система не лише фіксує відхилення, а й забезпечує механізм їх усунення в рамках єдиного інформаційного середовища.

Практична цінність запропонованої архітектури полягає в тому, що вона може бути реалізована поетапно: підприємство може розпочати з інтеграції MES і WMS як ключового модуля, що несе найбільший економічний ефект, а згодом підключати інші підсистеми. Модульна побудова архітектури забезпечує незалежність компонентів та можливість заміни будь-якого модуля без перебудови всієї системи [2, 4].

**Висновки.** Запропонована архітектура інтегрованої IT-системи реалізує наскрізний двосторонній зв'язок між MES-системою управління розкроєм та WMS-системою обліку матеріальних запасів у межах єдиного замкненого контуру управління виробничими завданнями. Це забезпечує автоматичне оновлення складських залишків в режимі реального часу, коректний розрахунок ROP та автоматичне формування сигналів поповнення запасів через SCM-систему. Зворотні зв'язки від BI-системи дозволяють оперативно коригувати виробничу програму на основі фактичних даних. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію модуля нормативів з інструментами автоматизованого проектування та оптимізації розкладки лекал.

## References


1. Al Sany S.M.A., Rahman M., Haque S. ERP-MIS Integration for Intelligent Apparel Production Planning. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2025. Vol. 17(1). P. 145-156. DOI: 10.30574/wjaets.2025.17.1.1387
2. Simion G., Filipescu A., Ionescu D., Filipescu A. Cloud/VPN-Based Remote Control of a Modular Production System. Sensors. 2025. Vol. 25(2). Art. 591. DOI: 10.3390/s25020591
3. Coelho J., Silva F.J.G., Pinto G. Real-world validation of a modular digital architecture in plastic manufacturing SMEs. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol.141.P.1905-1916. DOI: 10.1007/s00170-025-16792-1
4. Mourtzis D., Panopoulos N., Angelopoulos J. Modular smart manufacturing system design based on digital twin. Journal of Manufacturing Systems. 2023. Vol. 68. P. 115-129. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.03.001
5. Rosin F., Forget P., Lamouri S., Pellerin R. Enhancing the Industry 4.0 transformation through a lean management approach. International Journal of Production Research. 2023. Vol. 61(14). P. 4828-4847. DOI: 10.1080/00207543.2022.2116734
6. Wang Y., Ma H.-S., Yang J.-H., Wang K.-S. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. Advances in Manufacturing. 2023. Vol. 5(4). P. 311-320. DOI: 10.1007/s40436-017-0204-7

# КОНЦЕПТУАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО МАРКУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

**Васильківський О.В., Васильченко В.Ю., Губар Є.Я., Канашевич Г.В., Хижняк Є.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Дефекти електрохімічного маркування виробів із нержавкої сталі знижують надійність маркування поверхні й потребують своєчасного виявлення, однак ефективна робота з ними неможлива без чіткої ідентифікації та класифікації. Саме тому побудова системи оцінювання якості, що охоплює повний комплекс показників, є основною науково-практичною проблемою роботи. Метою роботи є розроблення концепції інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для автоматизованого контролю якості маркування. Запропонована система поєднує аналіз експериментальних даних, математичне моделювання та експертні знання, спираючись на розширену ієрархічну сукупність критеріїв: оптичних, геометричних, фізико-механічних та експлуатаційних. Основним результатом є алгоритм цифрової обробки маркованої поверхні з подальшою класифікацією якості та алгоритм прийняття рішень за її результатами. Реалізація системи забезпечує об'єктивне виявлення дефектів електрохімічного травлення та створює підґрунтя для керованого підвищення якості поверхневого маркування в умовах сучасного машинобудівного виробництва.

**Ключові слова:** Пряме маркування деталей, електрохімічне травлення, система підтримки прийняття рішень, контроль якості, нержавка сталь, машинний зір.

# CONCEPTUAL SCHEME OF THE QUALITY CONTROL SYSTEM FOR ELECTROCHEMICAL MARKING OF METAL PARTS

**Vasylkivskyi O., Vasylchenko V., Hubar Y., Kanashevych H., Khyzhniak I.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** Defects in the electrochemical marking of stainless-steel products reduce the reliability of surface marking and require timely detection; however, effective management of these defects is impossible without clear identification and classification. This is why the development of a quality assessment system covering a comprehensive set of indicators is a key scientific and practical challenge of this study. The aim of this work is to develop a concept for an intelligent decision support system for automated quality control of marking. The proposed system combines the analysis of experimental data, mathematical modeling, and expert knowledge, based on an extended hierarchical set of criteria: optical, geometric, physical-mechanical, and operational. The main results are an algorithm for digital processing of the marked surface, followed by quality classification and a decision-making algorithm based on its results. The implementation of the system ensures objective detection of electrochemical etching defects and creates a foundation for the controlled improvement of surface marking quality in modern machine-building production.

**Keywords:** Direct part marking, electrochemical etching, decision support system, quality control, stainless steel, machine vision.

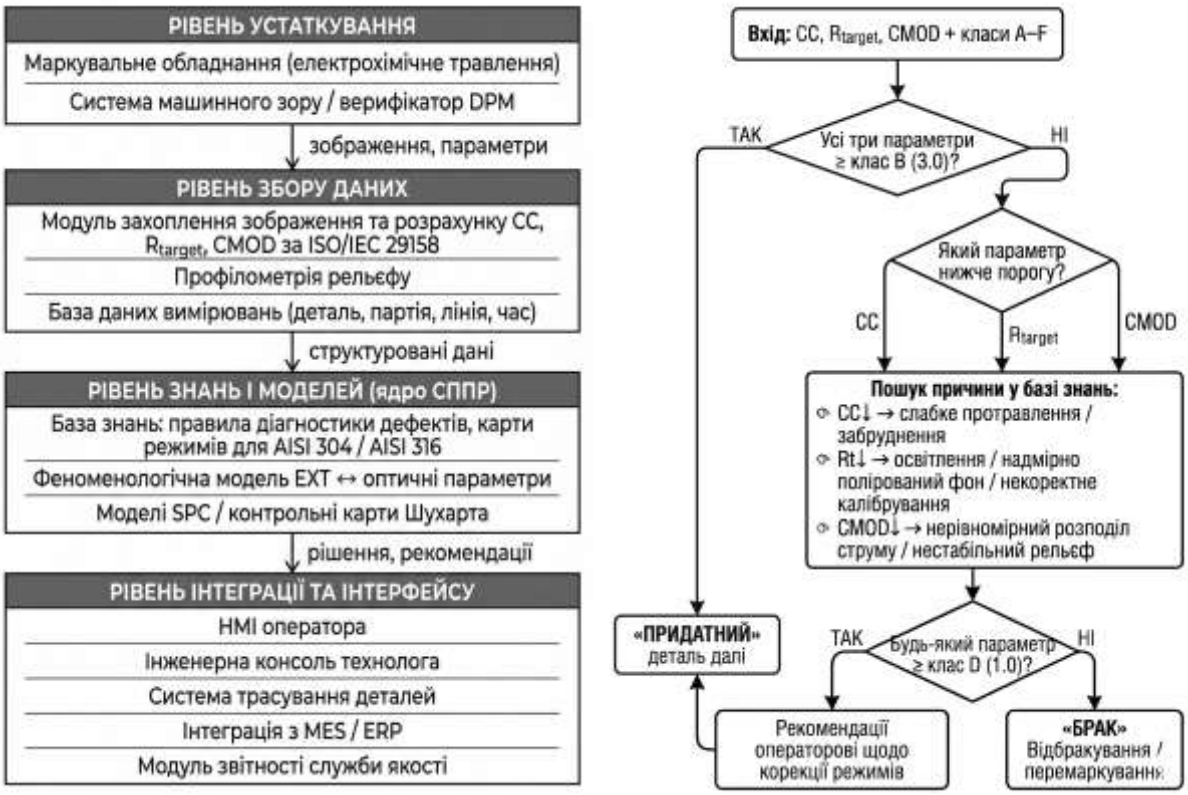
**Вступ.** Пряме маркування виробів (Direct Part Marking, DPM) методом електрохімічного травлення широко застосовується у машинобудуванні для нанесення інформативних символів, логотипів та інших графічних елементів безпосередньо на металеві поверхні деталей без термомеханічного навантаження на матеріал з метою відстеження упродовж їхнього життєвого циклу. Разом з тим існуючі стандарти не надають технологічних рекомендацій щодо корекції параметрів процесу маркування у разі виявлення дефектів. Оцінювання якості DPM-символів регламентується міжнародним стандартом ISO/IEC 29158 [1], який базується на модифікації методики ISO/IEC 15415 [2] з урахуванням особливостей рельєфного маркування. Однак цей стандарт орієнтований переважно на двовимірні штрихові коди і не повною мірою охоплює довільні зображення без фіксованих структурних шаблонів. Автоматизована оцінка якості таких зображень потребує спеціалізованої системи підтримки прийняття рішень (СППР), що зможе поєднати методи машинного зору, феноменологічне моделювання процесу та базу технологічних знань.

**Мета роботи.** Розробити концептуальну схему інформаційно-технологічної системи контролю процесу електрохімічного маркування металевих деталей довільними графічними зображеннями.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи верифікації DPM-кодів зводять оцінювання до формального висновку про відповідність або невідповідність вимогам стандарту, не розкриваючи природи виявлених дефектів і не пропонуючи підходів до їх усунення. Для електрохімічно протравлених поверхонь металів (представлені дослідні зразки аустенітних корозійностійких сталей типу AISI 304/316) критичними є нерівномірність травлення, розмиття контурів модулів і зміна мікрогеометрії поверхні, що впливає на оптичні характеристики зображення. Введення додаткового параметру «модуль маркування» дає змогу локалізувати проблемні ділянки, однак для практичного застосування потрібна інтелектуальна система, здатна об'єднати аналіз зображень, розрахунок критеріїв якості та рекомендації технологу.

**Вирішення проблеми.** За класифікацією Д. Пауера системи підтримки прийняття рішень поділяються на п'ять класів за домінуючим ресурсом підтримки [3]. Для контролю якості електрохімічного маркування запропоновано поєднання систем на основі даних, моделей і знань, що перетворюють вимірювання машинного зору на діагностику дефектів і рекомендації щодо режимів обробки.

Концептуальна схема такої системи (рис. 1, а) охоплює чотири рівні: обладнання й засоби візуального контролю, збір та обробку зображень, базу знань і моделей, а також інтеграцію з операторським інтерфейсом та виробничими інформаційними системами. Така архітектура забезпечує масштабованість системи та можливість вбудовування в існуючі лінії контролю якості виробництва.




*а)* *б)*

Рис. 1. а) Концептуальна схема СППР контролю якості DPM-маркування
б) Алгоритм прийняття рішень СППР

Алгоритм системи підтримки рішень (рис. 1, б) працює поверх результатів обробки зображення маркування (рис. 2) і класифікує його якість за п’ятьма рівнями з одночасною діагностикою причин дефектів. Після обчислення оптичних параметрів система визначає загальний клас якості за найгіршим показником. Якщо всі вони не нижчі за заданий поріг, деталь вважають придатною, інакше на основі бази знань встановлюють імовірні технологічні причини та, за потреби, рекомендують корекцію режимів електрохімічного травлення [4], відбраковуючи деталі з критично низькими значеннями параметрів. Сформовані висновки і рекомендації автоматично фіксуються у звіті та накопичуються в базі даних для подальшого навчання системи.

Алгоритм обробки зображень маркування послідовно виконує зчитування та перетворення зображення у відтінки сірого, нормування яскравості, побудову гістограми та автоматичну бінаризацію методом Оцу. Після чого зображення розбивається на сітку елементів «модулів марування», для яких обчислюють показники контрасту, відбивної здатності та модуляції згідно з вимогами ISO/IEC 29158. На завершальному етапі система присвоює клас якості за кожним критерієм, формує карти модуляції, гістограми та зведені таблиці й експортує їх у файли для подальшого аналізу в середовищі контролю якості (рис. 2).

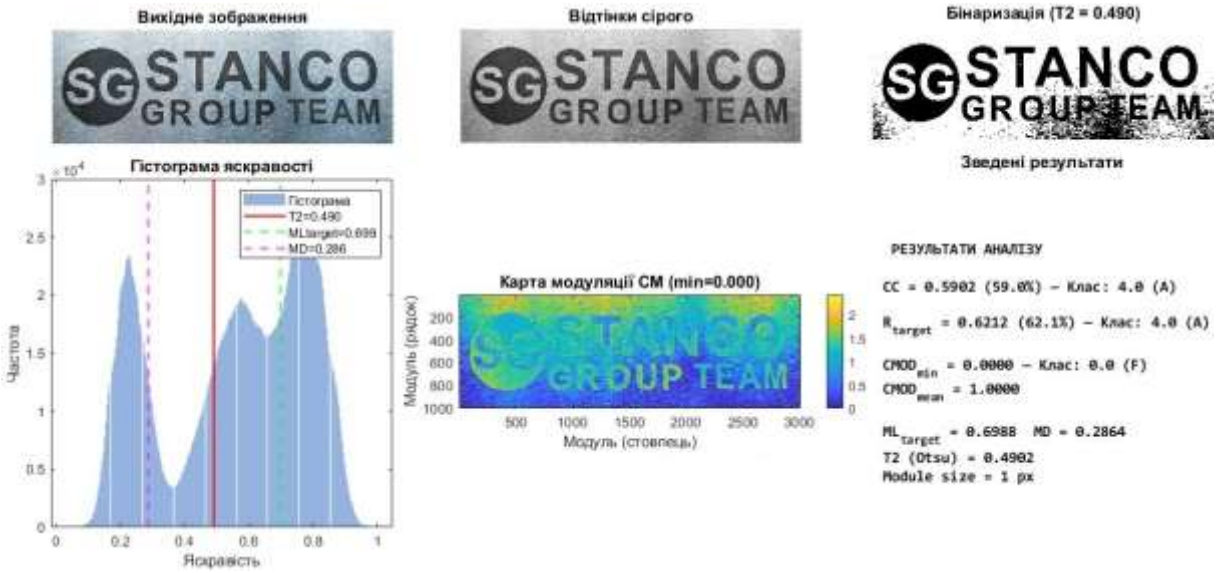



Рис. 2. Результат обробки оцифрованого DPM-зображення засобами MATLAB

**Висновки.** Розроблено концепцію комплексної системи підтримки прийняття рішень для контролю якості прямого маркування металевих деталей, яка поєднує аналіз зображень, розрахунок показників якості за стандартом ISO/IEC 29158 та діагностику дефектів на основі накопичених знань. Запропоновано багатокроковий алгоритм обробки зображень з автоматичним обчисленням ключових оптичних параметрів і подальшою класифікацією якості разом із технологічними рекомендаціями щодо корекції режимів електрохімічного травлення. Чотирирівнева архітектура системи дає змогу інтегрувати її в реальні виробничі інформаційні системи, а подальший розвиток передбачає розширення бази знань за результатами промислових випробувань для прогнозування якості маркування.

## Список використаних джерел


1. ISO/IEC 29158:2020. Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Direct Part Mark (DPM) quality guideline. Geneva, 2020.
2. ISO/IEC 15415:2011. Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Bar code print quality test specification – Two-dimensional symbols. Geneva, 2011.
3. Power D. J. Decision support systems: concepts and resources for managers. Westport: Greenwood Publishing Group, 2002. 272 p.
4. Khorasani A. M., Paydar M. H., Razavi A. R., et al. Electrochemical polishing of austenitic stainless steels. Materials. 2020. Vol. 13, No. 11. Art. 2602.

# ГІБРИДНА LUT-СУРОГАТНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ІНВЕРСІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ

**Гальченко В.Я., Сторчак А.В., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Запропоновано гібридний метод на основі дворівневої технології таблиць пошуку LUT у реальному масштабі часу, який реалізовано поєднанням попередньо створеної сурогатної моделі в невластивому їй застосуванні та таблиць з дворівневою структурою. Таблиця першого рівня «грубих значень» формується з використанням «точної» математичної моделі. На основі найближчих до вимірювань значень таблиці першого рівня формується динамічна таблиця другого рівня з малою дискретністю, значення якої швидко обчислюються за допомогою нейромережевої сурогатної моделі. Повний цикл відшукування інверсійних параметрів об'єктів складає близько 38 мс, що відповідає вимогам вимірювань в реальному масштабі часу. Точність запропонованого методу залежить від обсягу таблиць другого рівня і складає не більше половини кроку між найближчими сусідніми параметрами. Експрес-метод суттєво зменшує обчислювальні ресурси в реальному масштабі часу і може використовуватися в різноманітних галузях науки та техніки. Зазначену інформаційну технологію продемонстровано на прикладі задачі відновлення профілів електрофізичних характеристик об'єктів при вихрострумовому контролі.

**Ключові слова:** таблиці пошуку, обернена задача, реальний масштаб часу, динамічний дворівневий пошук, нейромережева сурогатна модель

# HYBRID LUT-SURROGATE INFORMATION TECHNOLOGY FOR REAL-TIME RECONSTRUCTION OF OBJECT INVERSE PARAMETERS BASED ON INDIRECT MEASUREMENTS

**Halchenko V., Storchak A., Trembovetska R., Tychkov V.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** A hybrid method based on real-time two-level LUT technology is proposed, which is implemented by combining a previously created surrogate model in an unconventional application and tables with a two-level structure. This technology is demonstrated using the example of determining the profiles of electrophysical characteristics during eddy current testing. The first-level table of «rough values» is generated using a «precision» mathematical model. Based on the values in the first-level table that are nearest to the measurements, a second-level dynamic table with low resolution is generated, whose values are quickly calculated using a surrogate model. The complete cycle for determining the inversion parameters of objects takes approximately 38 ms, which meets the requirements for real-time measurements. The accuracy of the proposed method depends on the dimensionality of the second-level tables and is no more than half the step size between the nearest neighboring profiles. This information technology is demonstrated using the example of reconstructing the electrophysical characteristic profiles of objects during eddy current testing.

**Keywords:** look-up tables, inverse problem, real-time scale, dynamic two-level search, neural-network surrogate model

**Вступ.** Застосування LUT є поширеним методом при розв'язанні обернених вимірювальних задач в реальному масштабі часу, хоч цей підхід інколи може погіршити точність результатів, але при цьому значно спрощуються техніки процесінгу сигналів [1].

Продемонструємо переваги модифікованого методу дворівневого динамічного LUT, запропонованого авторами, на прикладі вихрострумового методу неруйнівного контролю для моніторингу стану зміни приповерхневої мікроструктури металів, що виникають при різноманітних технологічних операціях. Відомі на сьогодні методи визначення профілів електрофізичних параметрів об'єктів контролю (ОК) не завжди повністю враховують і реалізують актуальні на сьогодення вимоги [2, 3]. Так пропоновані широким колом дослідників методи розв'язку такої задачі нездатні забезпечити визначення обох розподілів в реальному масштабі часу з високою точністю по однократному результату реєстрації амплітуди та фази сигналу вихрострумовим перетворювачем (ВСП). Авторами в роботі [4]

запропоновано алгоритм розв'язання оберненої задачі оптимізаційним популяційним метаевристичним методом на базі проведених вимірювань вихрострумовим перетворювачем та створеної на попередньому етапі сурогатної моделі. Хоча в цьому випадку витрати часу незначні, проте недостатні для реалізації його в реальному масштабі часу. Отже, актуальним є розроблення експрес-методу розв'язання оберненої задачі щодо одночасного визначення профілів електричної провідності та магнітної проникності об'єктів контролю в реальному масштабі часу.

**Постановка задачі**. Математично проблема визначення профілів електрофізичних характеристик матеріалу ОК за проведеними вимірюваннями є оберненою задачею. Розв'язання такої задачі пропонується виконувати в декілька етапів: по-перше, створення сурогатної моделі із апріорним накопиченням інформації в результаті застосування глибоких нейронних мереж та квазівипадкових планів експериментів, по-друге, розв'язок задачі за допомогою таблиць пошуку Lookup tables (LUT).

**Мета роботи**: розроблення експрес-методу на основі дворівневої технології LUT як складової технології для визначення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик матеріалу об'єкту контролю у реальному масштабі часу.

**Вирішення проблеми**. Для розв'язання оберненої задачі вимірювання профілів електрофізичних параметрів ОК в рамках цих досліджень пропонується застосування дворівневого пошуку по апріорі підготовленій початковій таблиці. На першому етапі пошуку застосовується заздалегідь нарахована за «точною моделлю» процесу вимірювань таблиця "грубих значень" сигналу ВСП з досить великою дискретизацією і відповідних цьому сигналу параметрів ОК, тобто профілів провідності σ та магнітної проникності $\mu_r$ або інших параметрів у випадку розширеної мультифакторної таблиці. На другому етапі за знайденими найближчими "грубими значеннями" параметрів ОК динамічно формується новий набір уточнених проміжних значень. Новий набір створюється за допомогою нового детальнішого комп'ютерного плану експериментів на R-послідовностях Робертса. На основі цієї вибірки динамічно обчислюється і зберігається таблиця другого рівня. Обрахунок значень вихідного сигналу ВСП в таблиці здійснюється з використанням сурогатної моделі, що дозволяє виконати це в реальному масштабі часу. В дослідженні продемонстровано працездатність запропонованого ескпрес-методу на чисельних експериментах при вихідних даних взятих із [4]. В якості "невідомого профілю" був використаний контрольний зразок вимірювання, який заздалегідь обчислений за «точною моделлю». Тоді за сигналом ВСП із таблиці першого рівня відшукуються найближчі значення, що відповідають грубим значенням профілів. Далі використовується таблиця другого рівня створена динамічно. При цьому за новим планом експериментів визначаються проміжні масштабовані значення змінних, за якими потім формується набір даних таблиці другого рівня. В цій таблиці другого рівня аналогічно до пошуку в таблиці першого рівня визначаються найближчі значення вихідного сигналу ВСП для контрольного зразка.

**Висновок.** В дослідженні розроблено експрес-метод на основі комбінування використання сурогатної нейромережевої моделі в невластивому їй застосуванні та дворівневої таблиці пошуку Look-up tables, другий рівень якої створюється динамічно та забезпечує час повного розв'язання оберненої задачі у реальному масштабі часу.

## Список використаних джерел


1. Tang, X., Wang, Y., Cao, T., Zhang, L. L., Chen, Q., Cai, D., Liu, Y. & Yang, M. (2023, October). LUT-NN: Empower efficient neural network inference with centroid learning and table lookup. In *Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (pp. 1-15). https://doi.org/10.1145/3570361.3613285
2. Burkhardt, J. (2019). Determination of the conductivity and thickness of conductive layers on conductive base materials. *Advances in Mechanical Engineering*, *11*(7), 1-9. https://doi.org/10.1177/1687814019854234
3. Theodoulidis, T. (2019). Impedance of a coil above a planar conductor with an arbitrary continuous conductivity depth profile. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, *59*(4), 1179-1185. https://doi.org/10.3233/JAE-171122
4. Гальченко, В. Я., Тичков, В. В., Сторчак, А. В., & Трембовецька, Р. В. (2020). Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів при вихрострумових вимірюваннях із наявністю апріорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі. *Український метрологічний журнал*, (1), 35-50. https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2020.204226

# ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА СПОСТЕРЕЖЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЗА ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОВЕРХНІ З ВАННИ РОЗПЛАВУ

**Мацепа С.М.[1], Канашевич Г.В.[1], Малецький Є.В.[2], Коваленко Ю.І.[1], Коваленко О.О.[1], Губар Є.Я.[1]**
[1]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2]МГО «Асоціація безперервної фахової освіти "Атенеум"», Чернігів, Україна

**Анотація.** В роботі розглянуто питання створення спеціалізованої комп'ютерної системи спостереження і контролю процесу електронно-променевої обробки оптичного скла при формуванні поверхні з ванни розплаву глибиною 20…200 мкм. Показано, що обробка низькоенергетичним електронним потоком (E < 10 кеВ) супроводжується утворенням рідинно-текучого стану, десорбцією іонів Na+ і K+, леткістю частини матеріалу та випромінюванням із характерним забарвленням у зоні контакту електронного потоку з матеріалом. Для підвищення стабільності процесу запропоновано інформаційну систему, що поєднує технічний зір, пірометричний контроль температури та дистанційно керований виконавчий механізм для безпечного позиціювання реєструючих пристроїв..
**Ключові слова:** електронно-променева обробка, оптичне скло, ванна розплаву, комп'ютерна система спостереження, технічний зір, пірометр.

# INFORMATION SYSTEM FOR OBSERVATION AND CONTROL OF THE ELECTRON-BEAM PROCESSING OF OPTICAL MATERIAL DURING SURFACE FORMATION FROM A MELT POOL

**Matsepa S.[1], Kanashevych H.[1], Maletskyi Ye.[2], Kovalenko Yu.[1], Kovalenko O.[1], Hubar Ye.[1]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]City Public Organization "Association for Continuing Professional Education 'Athenaeum'", Chernihiv, Ukraine

**Abstract.** The paper considers the development of a specialized computer system for monitoring and control of electron-beam processing of optical glass during surface formation from a melt pool with a depth of 20–200 μm. Low-energy electron-beam treatment (E < 10 keV) is accompanied by the formation of a liquid-flow state, desorption of $Na^+$ and $K^+$ ions into vacuum, partial material volatility, and characteristic radiation in the beam–material contact zone. To improve process stability, an information system is proposed that combines machine vision, pyrometric temperature control, and a remotely controlled actuator for safe positioning of measuring and recording devices.
**Keywords:** electron-beam processing, optical glass, melt pool, computer monitoring system, machine vision, pyrometer.

**Вступ.** Проблема керування якістю поверхні та поверхневого шару оптичного матеріалу під час електронно-променевої обробки залишається актуальною [1–3]. Її розв'язання потребує вивчення фізичних явищ у зоні дії електронного потоку та впровадження систем моніторингу, реєстрації технологічних параметрів і комп'ютерного керування режимами обробки. Перспективним є застосування технічного зору та автоматизованого аналізу даних безпосередньо під час технологічного процесу..

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка інформаційної системи спостереження і контролю за процесом електронно-променевої обробки оптичного матеріалу при формуванні нової поверхні з ванни розплаву.

**Постановка задачі.** Відомо [1–3], що застосування абразиву, травильних і миючих речовин у промислових технологіях шліфування та полірування призводить до утворення на поверхні оптичного матеріалу стохастично розташованого мікрорельєфу, а також тріщинуватого шару, який може залягати на глибину 1…1,5 мкм. Наявність такого шару погіршує прозорість матеріалу та обмежує можливості використання прецизійних

технологій мікроелектроніки при виготовленні елементів мікрооптики з лінійними розмірами 30…100 мкм.

Суть процесу поверхневої електронно-променевої обробки оптичного матеріалу полягає в проплавленні поверхневого шару матеріалу на глибину від 20 до 200 мкм з подальшим його охолодженням. Процес відбувається у вакуумі з залишковим тиском $P=10^{-3}…10^{-4}$ Па при температурах в зоні дії електронного потоку 950…1300ºС. Ванна розплаву, яка утворюється з переходом матеріалу від твердого до рідинно-текучого стану, знищує тріщинуватий шар, а після охолодження розплаву сили поверхневого натягу забезпечують утворення молекулярно гладкої поверхні з залишковими мікронерівностями величиною у 3…5 нм. Водночас, у зоні фізичного контакту електронного потоку з матеріалом, відбуваються складні фізичні явища: локальний нагрів, розплавлення, десорбція іонів Na+ і K+, леткість частини матеріалу з розплаву у вакуум, що супроводжується інтенсивним кольоровим забарвленням. Ці явища можуть бути використані як інформативні ознаки для спостереження та коригування режимів обробки.

Створення інтегрованої системи спостереження і контролю є важливим етапом модернізації технології електронно-променевої обробки, що забезпечує ефективне комп'ютеризоване керування процесом, підвищує його надійність, продуктивність і безпечність експлуатації обладнання. Запропонована інформаційна система розглядається як локальна десктопна інформаційно-вимірювальна система, що працює біля електронно-променевої установки та не потребує передавання технологічних даних у хмарне середовище. Програмну частину системи доцільно реалізувати на основі Python із використанням засобів комп'ютерного зору, обробки даних, формування інтерфейсу оператора та обміну даними з пірометром і виконавчими пристроями.

**Вирішення проблеми.** В попередніх роботах [1-2] представлені схеми алгоритмів керування якістю електронно-променевої обробки оптичного скла. Проте наведені алгоритми описують загальний процес керування якістю обробки поверхневого шару і не використовують засоби спостереження фізичних явищ, що відбуваються в зоні формування ванни розплаву. У запропонованій системі програмний модуль виконує приймання відеокадрів і температурних даних, попередню фільтрацію зображення, виділення зони випромінювання, порівняння отриманих параметрів із заданими межами та формування сигналу для коригування режимів електронного потоку.

В даній роботі, в якості інструмента обробки використано гармату Пірса, яка генерує та формує електронний потік стрічкової форми з параметрами: питома потужність потоку $10^1$Вт/см$^2$≤Рпит≤ $10^3$ Вт/см$^2$, прискорююча напруга потоку $U_{приск}$=1,5…12 кВ, струм електронного потоку $I_{потоку}$= 50…500 мА. В якості об'єкту обробки використано пластини круглої (діаметр 20,0 мм, товщина 2;4; 6; 8 мм)) і прямокутної форми (70×14×6 мм) з оптичного скла силікатної групи К8, К108. На рис.1. представлено спрощену схему процесу електронно-променевої обробки поверхні оптичного скла з утворенням ванни розплаву, а на рис. 2 – структурну схему системи спостереження, автоматичного контролю та регулювання температури на поверхні ванни розплаву.




Рис. 1. Схема процесу електронно-променевої обробки поверхні оптичного скла з утворенням ванни розплаву

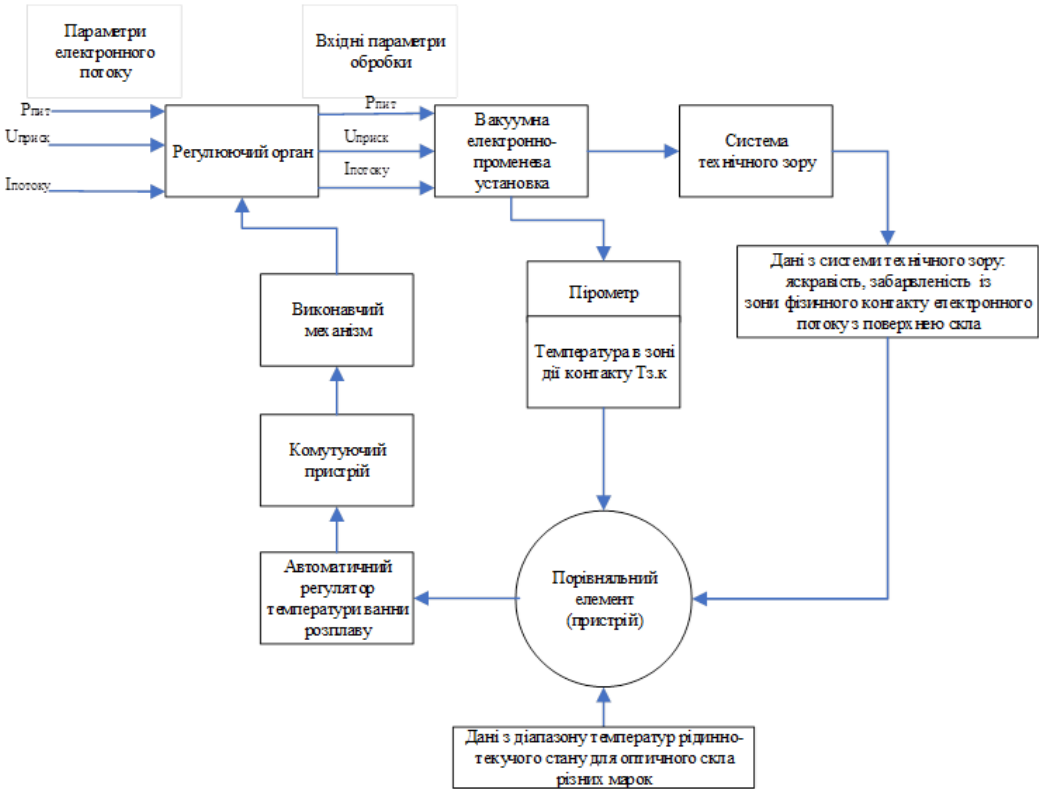



Рис. 2. Структурна схема системи спостереження та автоматичного контролю і регулювання температури на поверхні ванни розплаву з використанням технічного зору і пірометра

Новий підхід ґрунтується на спостереженні, з використанням технічного зору фізичного явища випромінювання із зони фізичного контакту електронного потоку і матеріалу. Температура матеріалу в зоні обробки вимірюється за допомогою пірометра, порівнюється з даними фізико-технічних характеристик оптичного скла різних марок та даними отриманими за допомогою технічного зору (інтенсивність випромінювання та його кольорове забарвлення). Отримана інформація використовується як зворотний зв'язок для коригування через регулюючий орган параметрів електронного потоку $P_{пит}$, $U_{приск}$, $I_{потоку}$ при формуванні ванни розплаву.

**Висновок.**

1. Вперше, для вдосконалення існуючої технології поверхневої електронно-променевої обробки оптичних матеріалів, запропоновано локальну десктопну інформаційно-вимірювальну систему спостереження і контролю процесу формування молекулярно гладкої поверхні з ванни розплаву.

2. Візуалізація явищ леткості матеріалу та контроль температури в зоні обробки дають додаткові можливості для гнучкого керування процесом утворення ванни розплаву та стабілізації якості обробленої поверхні.

## Список використаних джерел


1. Щерба А. І. Алгоритм керування якістю поверхневого шару оптичних матеріалів при електронно-променевій мікрообробці / А. І. Щерба, Г. В. Канашевич, І. В. Дробот // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : зб. наук. пр. Темат. вип. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. Харків : НТУ «ХПІ», 2012. № 27. С. 231–239.
2. Мацепа С. М. Покращення якості оптичних поверхонь елементної бази інформаційних систем методом електронно-променевої мікрообробки / С. М. Мацепа, Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, Р. В. Цинда, І. С. Жайворонок // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2021. № 4. С. 35–44. DOI: 10.24025/2306-4412.4.2021.244832.
3. Grasso M., Colosimo B. M. A review of the current state-of-the-art on in situ monitoring in electron beam powder bed fusion // Progress in Additive Manufacturing. 2024. Vol. 9. P. 1449–1466. DOI: 10.1007/s40964-024-00576-2.

# РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПЕРШОРІВНЕВОЇ ІНТЕРМОДАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ НЕКОНТЕЙНЕРНОГО ТИПУ

**Могілей С.О.[1], Мурр П.[2], Гончаров А.В.[3]**
[1]Східноєвропейський університет імені Рауфа Аблязова, Черкаси, Україна
[2]Міжнародний університет науки і технологій у Кувейті, Ардія, Кувейт
[3]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. В науковій роботі наводяться постановка та метод розв'язування першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу. Метою дослідження є вивчення особливостей формалізації та розробка методу розв'язування поставленої задачі. Основним завданням роботи є створення методології розв'язування інтермодальних задач неконтейнерного типу різних рівнів. Об'єктом дослідження є процес розв'язування першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу; предмет дослідження – математична модель даної задачі. В дослідженні розкрито необхідний понятійний апарат, визначено відмінність між класичними (контейнерними) та неконтейнерними типами інтермодальних транспортних задач. Введено поняття транзитного рівня поставленої задачі; виконано її математичну формалізацію та розроблено метод розв'язування першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу. В основу даного методу покладено декомпозицію поставленої задачі в форматі послідовності класичних транспортних задач.

**Ключові слова**: інтермодальні перевезення, транспортна задача, транзитний рівень, неконтейнерний тип, критерій оптимізації.

# SOLVING FIRST-LEVEL INTERMODAL TRANSPORT PROBLEM OF NON-CONTAINER TYPE

**Mogilei S.[1], Murr P.[2], Honcharov A.[3]**
[1]Rauf Ablyazov East European University, Cherkasy, Ukraine
[2]International University of Science and Technology in Kuwait, Ardiya, Kuwait
[3]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The scientific work provides the formulation and method of solving the first-level intermodal transport problem of non-container type. The purpose of the research is to study the features of formalization and develop a method for solving the problem. The main task of the work is to create a methodology for solving intermodal problems of non-container type at different levels. The object of the research is the process of solving the first-level intermodal transport problem of non-container type; the subject of research is a mathematical model of this problem. The necessary conceptual apparatus is disclosed in the study, the difference between the classical (container) and non-container types of intermodal transport problems is determined. The concept of the transit level of the problem is introduced; its mathematical formalization is carried out, and the method of solving the first-level intermodal transport problem of non-container type is developed. This method is based on the problem decomposition into the format of a sequence of classical transport problems.

**Keywords**: intermodal transportation, transport problem, transit level, non-container type, optimization criterion.

**Вступ**. Науково-прикладне дослідження інтермодальних транспортних перевезень залишається актуальним в контексті всеосяжних процесів глобалізації світової економіки [1]. Оптимізаційні моделі таких перевезень формалізуються у вигляді інтермодальних транспортних задач – як класичного (контейнерного), так і неконтейнерного типів [2].

При класичному (контейнерному) типі інтермодальних транспортних перевезень вантаж перевозиться в контейнері, який завантажується в пункті відправки і розвантажується в пункті доставки [3]. Цільовою функцією відповідної інтермодальної транспортної задачі зазвичай виступають функції мінімізації собівартості, ризику або часу таких перевезень.

Неконтейнерний тип інтермодальних транспортних перевезень передбачає можливість пересортування вантажів в транзитних пунктах – тобто, тих пунктах, які знаходяться між пунктами відправки і пунктами доставки. Відповідно, для транспортних задач такого типу пропонується класична цільова функція мінімізації собівартості перевезень – хоча критерієм оптимізації може виступати й загальний час перевезень тощо, а самих цільових функцій може бути декілька (багатокритеріальна інтермодальна транспортна задача).

Якщо процес доставки вантажів передбачає наявність одного транзитного пункту, то такий пункт є транзитним пунктом першого рівня, а відповідна транспортна задача – першорівневою інтермодальною транспортною задачею. Якщо транзитних пунктів першого рівня декілька, то вони формують перший транзитний рівень інтермодальної транспортної задачі. Далі, якщо в інтермодальній задачі є два транзитних рівня, то йдеться про другорівневу інтермодальну транспортну задачу і т.д.

**Мета роботи**. Метою роботи є розробка методу розв'язування першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу з цільовою функцією мінімізації загальної собівартості транспортних перевезень.

**Постановка задачі**. Постановка першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу передбачає, що наступні параметри є відомими:

- кількість пунктів відправки та величини запасів вантажу в них;
- кількість транзитних пунктів першого рівня та величини собівартостей перевезень між ними та пунктами відправки і доставки;
- кількість пунктів доставки та величини їх потреб у вантажі.

Необхідно визначити оптимальні плани транспортних перевезень з пунктів відправки до пунктів доставки вантажів через транзитні пункти першого рівня за критерієм мінімізації собівартості таких перевезень.

**Вирішення проблеми**. Принципова відмінність інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу від класичної полягає в наявності транзитних пунктів – в даному випадку лише одного, першого, рівня. Це означає, що поставлену задачу можна розглядати як послідовність двох класичних транспортних задач, – з однією цільовою функцією мінімізації *S* та двома матрицями собівартостей перевезень $C^1 = (c_{ik})$ та $C^2 = (c_{kj})$:

$$\begin{gathered} S(X^1, X^2) = C^1 \times X^1 + C^2 \times X^2 \to min, \\ \sum_{k=1}^{l} x_{ik} = a_i; \sum_{i=1}^{n} x_{ik} = t_k, \\ \sum_{j=1}^{m} x_{kj} = t_k; \sum_{k=1}^{l} x_{kj} = b_j, \\ x_{ik} \geq 0, x_{kj} \geq 0, i = \overline{1,n}, k = \overline{1,l}, j = \overline{1,m}, \end{gathered} \tag{1}$$

де $n, l, m$ – кількості пунктів відправки, транзитних пунктів і пунктів доставки відповідно;
$X^1 = (x_{ik}), X^2 = (x_{kj})$ – шукані матриці опорних планів, $x_{ik}, x_{kj}$ – кількості вантажу, що перевозяться з *i*-го пункту відправки до *j*-го пункту доставки через *k*-й транзитний пункт;
$c_{ik} \geq 0, c_{kj} \geq 0$ – вартості (за одиницю) вантажу, що перевозиться з *i*-го пункту відправки до *j*-го пункту доставки через *k*-й транзитний пункт;
$a_i > 0$ є величинами запасів у *i*-му пункті відправки, $t_k > 0$ є величинами потреб/запасів у *k*-му транзитному пункті і $b_j > 0$ є величинами потреб у *j*-му пункті доставки. Крім того, виконуються рівності:

$$\sum_{i=1}^{n} a_i = \sum_{k=1}^{l} t_k = \sum_{j=1}^{m} b_j.$$

Відношення $C^1 \times X^1, C^2 \times X^2$ розписуються як:

$$C^1 \times X^1 = \sum_{i,k=1}^{n,l} c_{ik} \cdot x_{ik}\,; C^2 \times X^2 = \sum_{k,j=1}^{l,m} c_{kj} \cdot x_{kj}. \tag{2}$$

Окремо варто звернути увагу на те, що транзитні пункти, відносно початкових пунктів відправки, виступають пунктами доставки з невідомими величинами потреб; навпаки, для початкових пунктів доставки транзитні пункти виступають пунктами відправки з

невідомими величинами запасів. Такий підхід дає змогу сформулювати узагальнений метод розв’язування поставленої задачі:

1. Формалізувати класичну транспортну задачу щодо визначення оптимального плану транспортних перевезень з початкових пунктів відправки до транзитних пунктів.

2. Формалізувати класичну транспортну задачу щодо визначення оптимального плану транспортних перевезень з транзитних пунктів до початкових пунктів доставки.

3. Об’єднати (сумувати) цільові функції задач пунктів 1 і 2 в одну цільову функцію, враховуючи в множині обмежень поставленої задачі всі наведені вище умови.

4. Використовуючи відомі чисельні методи оптимізації та виходячи з вигляду цільової функції і множини обмежень пункту 3, розв’язати поставлену задачу.

Тобто, після підстановки (2) в (1) поставлена задача може бути розв’язана за допомогою будь-яких наявних програмних засобів. Втім, при збільшенні рівня інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу ймовірною є необхідність розробки спеціального програмного продукту для її розв’язання.

**Висновок**. У ході проведеного дослідження було виконано формалізацію та розроблено метод розв’язування першорівневої інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу з критерієм мінімізації загальної собівартості перевезень вантажів. Показано, що досліджувана задача може бути зведена до задачі лінійної оптимізації шляхом декомпозиції поставленої задачі в форматі послідовності класичних транспортних задач. Розроблений метод розв’язування інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу цілком застосовний для даних задач будь-якого рівня. При цьому високий рівень поставленої задачі може вимагати розробки спеціального програмного забезпечення для її розв’язання.

## Список використаних джерел


1. Abu-Aisha, T., Audy, J.-F. and Ouhimmou, M. (2024). Toward an efficient sea-rail intermodal transportation system: a systematic literature review. Journal of Shipping and Trade, (9, 23). doi: 10.1186/s41072-024-00182-z
2. Перепелиця, О. В., Гончаров, А. В. та Могілей, С. О. (2025). Особливості постановки інтермодальної транспортної задачі неконтейнерного типу. *Матеріали LII-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку»*. с. 267-270. doi: 10.52058/52
3. Pan, W., Yan, B., Wang, L. and Zhu, X. (2026) Integrating Berthing Plan and Container Transshipment at the Sea-Rail Intermodal Terminal. *IET Intelligent Transport Systems*, (20, 1). doi: 10.1049/itr2.70123.

# ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

**Остроумов І.[1], Кузьменко Н.[2]**
[1]Київська Школа Економіки, Київ, Україна
[2]Київський Авіаційний Інститут, Київ, Україна

**Анотація**. Точність навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) значною мірою залежить від точності бортових датчиків позиціонування. Висота БПЛА визначається за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), а також барометричних датчиків, що оцінюють висоту відносно стандартної ізобаричної поверхні з тиском 1013,25 гПа. Більшість комерційно доступних датчиків тиску мають абсолютну точність близько 1 гПа, тоді як вартість більш точних сенсорів зростає експоненційно. У цій роботі досліджується підхід до поєднання даних на основі двох недорогих датчиків тиску з метою підвищення точності оцінювання висоти. Розроблено ймовірнісну модель барометричного визначення висоти та застосовано метод максимальної правдоподібності для об'єднання даних сенсорів. Запропонована архітектура злиття включає етап калібрування для визначення точнісних характеристик кожного датчика та підвищення загальної точності оцінювання.

**Ключові слова**: Аеронавігація; інтелектуальна інфраструктура; інтелектуальні транспортні системи.

# PRESSURE SENSOR DATA INTEGRATION FOR PRECISE NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Ostroumov I.[1], Kuzmenko N.[2]**
[1]Kyiv School of Economics, Kyiv, Ukraine
[2]State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine

**Abstract.** Accurate navigation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) strongly depends on the precision of onboard positioning sensors. UAV altitude is typically determined using Global Navigation Satellite Systems, which provide altitude relative to the WGS84 reference ellipsoid, and barometric sensors, which estimate altitude relative to the standard isobaric surface at 1013.25 hPa. However, most commercially available low-cost pressure sensors exhibit an absolute accuracy of approximately 1 hPa, while the cost of higher-precision sensors increases exponentially. This paper investigates a data fusion approach based on two low-cost pressure sensors to enhance altitude estimation performance. A probabilistic model of barometric altitude measurement is developed, and a maximum likelihood method is applied for sensor data fusion. The proposed fusion architecture incorporates a calibration stage to identify the error characteristics of each sensor and improve overall estimation accuracy. The approach is experimentally validated through UAV flight tests using an Arduino-based platform equipped with two BMP280 pressure sensors. The results demonstrate that sensor fusion not only improves altitude estimation accuracy but also enhances system reliability in the presence of individual sensor faults.

**Keywords:** Air Navigation, Smart Infrastructure, Intelligent Transportation System.

**Вступ**. Більшість автопілотів для легких БПЛА квадрокопторної схеми укомплектована одним дешевим датчиком статичного тиску. Вимірянні дані використовуються автопілотом для стабілізації БПЛА у повітрі. Також ці дані необхідні для режиму утримування висоти, коли пілот ініціює цей режим БПЛА рухається горизонтально і пілот не витрачає увагу на дотримання висоти. Так наприклад датчик BMP 280 має точність вивітрювання тиску у 1 гПа. Для досягнення необхідної точності вимірювання висоти у 1м мікроконтролер має враховувати температурну корекцію та фільтрувати виміряні значення

[1, 2]. Нажаль незначні зміни температури від обладнання чи від руху повітряних мас впливають на покази, що погіршує точність вимірювань. Інтеграція даних барометричного висотоміра з GNSS призводить до значного здорожчення обладнання [3].

**Основна мета роботи** є розробка підходу для покращення точності вимірювання барометричної висоти за рахунок поєднання даних від двох дешевих сенсорів.

**Формулювання проблеми**. Більшість БПЛА квадрокоптерної схеми мають відкриту раму, що під час виконання місії впливає на виміри барометричної висоти. Незважаючи на точність датчика тиску у статичних умовах, його застосування на борту БПЛА призводить до значного підвищення рівня похибок. Сумісна обробка даних від декількох сенсорів дозволить значно покращити точність даних.

**Вирішення проблеми**. У роботі досліджується можливість застосування ймовірнісного підходу до поєднання даних від двох барометричних сенсорів на основі методу максимальної достовірності. Метод оцінює функцію правдоподібності як добуток функцій щільності ймовірності похибок окремих сенсорів, що дозволяє отримати оптимальну оцінку шляхом максимізації правдоподібності. Також у роботі розглядається поєднання даних на двох рівнях на рівні датчика статичного тиску та на рівні вже виміряної барометричної висоти.

Дані поєднуються за наступною формулою:

$$x_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_i^2}}, \tag{1}$$

Середньо квадратичне відхилення поєднаних даних тиску та висоти оцінюється наступним чином:

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sigma_i^2}}. \tag{2}$$

Розроблений підхід було експериментально випробувано. В експерименті застосовано цифровий датчик тиску BMP280, що забезпечує вимірювання тиску у діапазоні від 300 до 1100 гПа, що відповідає висотам від приблизно -500 м до 9 км. Абсолютна точність становить близько 1 гПа, а споживання енергії лише 2.7 мкА [4]. У апаратній реалізації HW-611 використано два такі датчики, підключені до платформи Arduino Uno через цифровий інтерфейс I2C. На рис.1 та рис. 2 наведені результати поєднання даних статичного тиску та барометричної висоти, за результатами експериментальних випробувань.

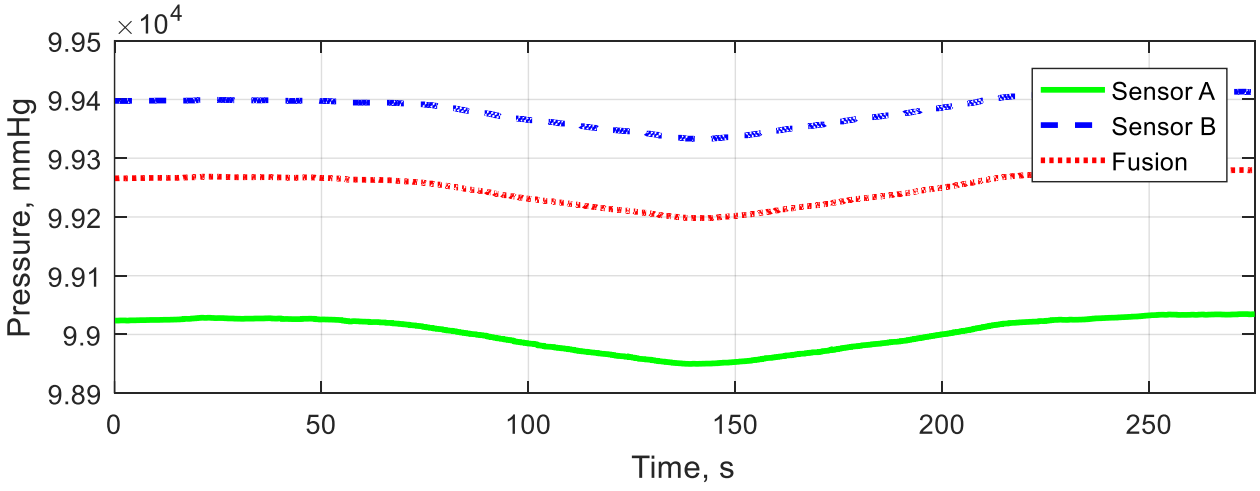



Рис. 1. Результати поєднання даних статичного тиску

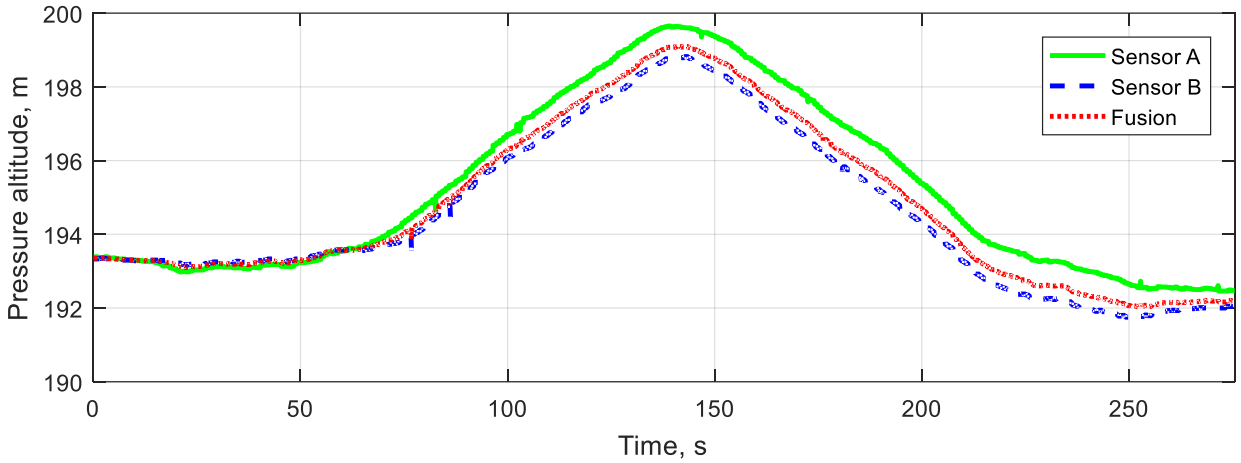


Рис. 2. Результати поєднання даних барометричної висоти

**Висновки**. Інтеграція двох датчиків в одній системі дозволяє суттєво підвищити точність позиціонування. Крім того, використання двох сенсорів підвищує загальну надійність системи, оскільки у випадку відмови одного з них інший може забезпечити резервування вимірювань. Таким чином, інтегрована сенсорна система є більш надійною для виконання задач вимірювання.

Результати експериментального дослідження інтеграції двох датчиків демонструють підвищення точності на 40% для сенсора А та на 19% для сенсора В за критерієм середньоквадратичного відхилення. Це підтверджує оптимальні властивості методу максимальної правдоподібності. Крім того, застосування цього методу забезпечує оцінки з високим рівнем достовірності. Отримані результати поєднання даних демонструють простоту інтеграції та значний потенціал використання двох датчиків для задач навігації та керування БПЛА.

**Список використаних джерел**

1. Yan, X., Yang, X., Zhang, J., Ding, S., Xiang, Z.: Adaptive Barometer/INS Fusion for UAV Altitude Estimation Under Strong Wind Disturbances. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 578, 1–12 (2026). doi: 10.1109/TAES.2026.3678578.
2. Le, K. T., Nguyen, T. T., Nguyen, T. D.: Improving UAV Altitude Estimation Using Barometric Sensor: A Method via Data Analysis. In International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), pp. 1–6. IEEE (2025).
3. Grigorie, T.L., Dinca, L., Corcau, J.I., Grigorie, O.: Aircrafts altitude measurement using pressure information: barometric altitude and density altitude. Wseas transactions on circuits and systems 9(7), 503–512 (2010).
4. BMP280. Digital Pressure Sensor. Data sheet, BST-BMP280-DS001-19. Bosch Sensortec (2018).

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ БПЛА

**Пташкін Р.Л.[1], Палагін В.В.[2]**
[1]Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі представлено інформаційні технології системного аналізу та методологічні підходи до дослідження архітектури безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що розглядається як складна мультипроцесорна робототехнічна система з розподіленим керуванням. Основну увагу приділено інформаційному моделюванню ієрархічної структури обчислювальних вузлів планера, що базуються на високошвидкісній паралельній обробці сигналів процесорами сімейства TMS320 та мікроконтролерами STM32 для забезпечення автономності навігації. Детально проаналізовано IT-архітектуру ізольованої комунікаційної надбудови на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi під керуванням ОС Raspbian, яка виконує роль інфраструктурного шлюзу для агрегації даних. Досліджено специфіку програмно-апаратної взаємодії між навігаційними модулями та розвідувальним блоком, що дозволяє реалізовувати складні сценарії фотофіксації та передачі телеметрії в реальному часі через відкриті цифрові мережі. Застосування методів hardware reverse engineering дало змогу деконструювати закриті алгоритми обробки інформації та логіку прийняття рішень системою в умовах радіоелектронного придушення. Отримані результати дозволяють моделювати динамічні процеси функціонування сучасних засобів повітряного нападу та розробляти ефективні алгоритми автоматизованої протидії на основі аналізу їхньої мережевої активності та апаратної структури.

**Ключові слова**: цифрова криміналістика, БПЛА, мікрокотролер STM32, DSP, реверс-інжиніринг апаратного забезпечення, Raspberry Pi.

# INFORMATION TECHNOLOGIES FOR RESEARCHING HETEROGENEOUS COMPUTING ENVIRONMENTS OF UAVS

**Ptashkin R.L.[1], Palahin V.V.[2]**
[1]Cherkasy Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper presents information technology methods for systems analysis and methodological approaches to examining the architecture of the UAV, viewed as a complex multiprocessor robotic system with distributed control. The primary focus is on the information modeling of the hierarchical structure of the airframe's computing units, which rely on high-speed parallel signal processing by TMS320 family processors and STM32 microcontrollers to ensure autonomous navigation. The IT architecture of an isolated communication add-on based on a Raspberry Pi single-board computer running Raspbian OS is analyzed in detail as an infrastructure gateway for data aggregation. The research investigates the specifics of software-hardware interaction between navigation modules and the reconnaissance unit, which enables complex scenarios for photo-fixation and real-time telemetry transmission via open digital networks. The application of hardware reverse engineering methods allowed for the deconstruction of proprietary information processing algorithms and the system's decision-making logic under conditions of electronic suppression. The findings provide a basis for modeling the dynamic processes of modern air attack assets and developing effective automated countermeasure algorithms based on the analysis of their network activity and hardware structure.

**Keywords:** digital forensics, UAV, microcontroller STM32, DSP, hardware reverse engineering, Raspberry Pi.

**Вступ.** Сучасний стан розвитку засобів дистанційного повітряного вторгнення характеризується стрімкою еволюцією від простих БПЛА до складних, адаптивних модульних платформ, зацікавленість якими стрімко зростає [1-3]. Основна проблематика криміналістичного дослідження сучасних БПЛА полягає у критичній невідповідності між уніфікованим зовнішнім виглядом планера та його внутрішнім інтелектуальним

наповненням. Традиційні підходи до ідентифікації техніки за візуальними ознаками втрачають свою актуальність, оскільки під ідентичною оболонкою можуть приховуватися принципово різні за призначенням та можливостями обчислювальні комплекси [4]. Це створює серйозні виклики для криміналістичної діяльності: експерт працює в умовах постійної варіативності апаратної бази, де стандартні навігаційні та польотні модулі доповнюються комерційними обчислювачами з власним програмним забезпеченням. Така гібридна архітектура дозволяє перетворювати дрон-камікадзе на літак-розвідник або активний вузол зв'язку без внесення змін у конструкцію планера. Проблема ускладнюється тим, що в таких конструктивних рішеннях відмовляються від класичних методів реєстрації польотних даних на фізичні носії всередині інерційних систем, що унеможливлює ретроспективний аналіз польоту через вилучення «чорної скриньки». Натомість акцент перенесено на передачу даних у реальному часі, що потребує від експерта переходу до методів аналізу динамічних мережевих процесів та деконструкції закритих програмних систем.

**Метою роботи** є розробка методологічного базису та інформаційних моделей для дослідження складної мультипроцесорної архітектури БПЛА типу Shahed-136 як об'єкта критичної робототехнічної інфраструктури. Дослідження спрямоване на системну ідентифікацію функціональних ролей окремих обчислювальних вузлів (DSP, STM32, SBC) та математичне моделювання закритих програмних алгоритмів міжпроцесорної взаємодії та передачі даних у реальному часі. Це дозволяє верифікувати реальне функціональне призначення апарату, виявити методи його інтеграції з глобальною мережевою інфраструктурою та синтезувати ефективні алгоритмічні контрзаходи на основі аналізу апаратної логіки та динамічних інформаційних процесів.

**Постановка задачі.** Основним завданням дослідження є деконструкція ієрархічної структури розподілених обчислювальних систем робототехнічної платформи та визначення принципів функціонування її автономних контурів керування. У межах поставленого завдання необхідно: виконати системний аналіз логіки функціонування основного бортового комп'ютера, навігаційних модулів та інтелектуальних виконавчих механізмів у єдиному інформаційному просторі апарату; дослідити архітектурну роль комунікаційних надбудов на базі одноплатних обчислювачів як допоміжних систем агрегації та обробки даних; ідентифікувати цифрові канали передачі телеметричної та розвідувальної інформації, що реалізуються через інтеграцію з комерційними мережами зв'язку; провести оцінку впливу динамічних потоків даних на моделювання процесів оперативного планування та ефективність алгоритмів автономного прийняття рішень у складних умовах

**Вирішення задачі** базується на поетапному апаратному та програмному реверс-інжинірингу вузлів БПЛА. Центральна обчислювальна система БПЛА являє собою складний модульний стек, що складається з восьми окремих друкованих плат, об'єднаних через спільну магістраль даних. Майже кожна з цих плат оснащена власним цифровим сигнальним процесором сімейства TMS320 [5]. Вибір такої архітектури обумовлений необхідністю інтенсивної паралельної обробки сигналів у реальному часі, що забезпечує високу точність керування та живучість системи при відмові окремих модулів. Взаємодія з механізацією крила та двигуном реалізована через блок керування сервоприводами, також побудований на базі DSP TMS320. Цей блок відповідає за динамічну зміну кута повороту керуючих поверхонь та регулювання положення дросельної заслінки. Навігаційний комплекс системи має розподілену структуру, де завадозахищена система CRPA GNSS інтегрована з блоком обробки даних трубки Піто на базі мікроконтролера сімейства STM32 та інерційною системою навігації також на базі STM32. Даний модуль здійснює позиціонування через аналіз даних з гіроскопів, акселерометрів та магнітометру [6].

Найбільшу загрозу в аспекті збору розвідувальної інформації становить комунікаційна надбудова на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi під керуванням ОС Raspbian [7]. Даний вузол функціонує як ізольована інтелектуальна платформа, що не має прямого доступу до шин основного польотного комп'ютера. Система інтегрує USB-модеми для

підключення до мереж 3G/4G та оснащується виносними дипольними антенами, що вказує на використання БПЛА як повітряної точки доступу Wi-Fi [8]. Програмне забезпечення цього вузла є закритим і виконує функцію агрегатора даних з автономних датчиків. Накопичена інформація в постійному режимі транслюється до центрів збору даних через боти або канали в месенджерах. Аналітична цінність такої системи полягає у отриманні інформації про проходження зон фіксації БПЛА. За наявності камер такий вузол здійснює фотофіксацію об'єктів у реальному часі.

**Висновок.** В роботі показано, що досліджуваний об'єкт БПЛА у сучасних модифікаціях трансформувався у складну багатоцільову мультипроцесорну платформу з розподіленою архітектурою обчислень. Встановлено, що інтеграція програмної надбудови на базі Raspberry Pi під керуванням ОС Raspbian дозволяє апарату функціонувати як автономний інфраструктурний шлюз, що забезпечує складну обробку та ретрансляцію даних у реальному часі. Доведено, що архітектурна відсутність штатних засобів логування в модулях на базі процесорів TMS320 та STM32 є цілеспрямованим рішенням, яке компенсується використанням комерційних стеків протоколів цифрового зв'язку для дистанційної передачі телеметрії. Моделювання процесів навігації показало високу адаптивність інформаційно-вимірювальної системи апарату до умов селективного придушення супутникових сигналів, де алгоритми автономної обробки даних від інерційних сенсорів забезпечують живучість системи. Застосування методів hardware reverse engineering у контексті інформаційних технологій дозволяє деконструювати логіку взаємодії компонентів робототехнічної системи та отримувати верифіковані дані про її функціонування за відсутності традиційних джерел цифрових доказів. Таким чином, запропонований підхід забезпечує перехід від пасивного аналізу наслідків до проактивного моделювання загроз та синтезу адаптивних алгоритмів захисту критичної інфраструктури, що базуються на глибокому аналізі апаратної та програмної логіки складних систем.

**Список використаних джерел**


1. Khan, Z.U. et al. (2025). Fundamentals and Applications of Unmanned Aerial Vehicle Swarms. In: Arshi, O., Khan, I.U., Kaushik, K., Iqbal, N., Ullah, I., Slimani, K. (eds) Unmanned Aerial Vehicles Swarm for Protecting Smart Cities . Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1047-3_14.
2. Bhat, G.R., Dudhedia, M.A., Panchal, R.A., Shirke, Y.S., Angane, N.R., Khonde, S.R., Khedkar, S.P., Pansare, J.R., Bere, S.S., Wahul, R.M. and Gawande, S.H., 2024. Autonomous drones and their influence on standardization of rules and regulations for operating–A brief overview. *Results in Control and Optimization*, *14*, p.100401.
3. S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, Y. Li, M. H. Alsharif, and M. A. Khan, "Unmanned aerial vehicles (uavs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends," *Intelligent service robotics*, vol. 16, no. 1, pp. 109–137, 2023.
4. Головне управління розвідки Міністерства оборони України. (2024). Shahed-136 (Герань-2). War & Sanctions. https://war-sanctions.gur.gov.ua/page-shahed-136
5. Головне управління розвідки Міністерства оборони України. (2025, 27 червня). Польотний контролер. Портал War & Sanctions. https://war-sanctions.gur.gov.ua/components/part/4797
6. Головне управління розвідки Міністерства оборони України. (2025, 25 листопада). Блок інерційної навігаційної системи (IMU). Портал War & Sanctions. https://war-sanctions.gur.gov.ua/components/part/5007
7. Головне управління розвідки Міністерства оборони України. (2025, 18 лютого). Серії «ЫІ» та «Ъ» — як росія модернізує «шахеди» та інші ударні БПЛА. https://gur.gov.ua/content/serii-y-ta-iak-rosiia-modernizuie-shakhedy-ta-inshi-udarni-bpla.html
8. Романюк Дмитро. (2025). Аналіз БПЛА-камікадзе противника, відмінності компонентів, додаткове обладнання. Збірник тез Міжнародного науково-практичного семінару "Інформаційна безпека та системи протидії" (ISPS-2025). https://crsi.mil.gov.ua/files/isps/isps-collection-2025.pdf

# РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕНЕРАТИВНО-ЗМАГАЛЬНИХ МЕРЕЖ

**Станкевич О.С., Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Запропоновано підхід використання генеративно-змагальних мереж GAN у формуванні простору можливих розв'язків обернених задач при непрямих вимірюваннях, який забезпечує коректне використання градієнтних оптимізаційних технік визначення шуканих параметрів властивостей об'єктів спостереження із врахуванням специфіки структури ландшафту низькорозмірного латентного простору їх кодування. Наведено чисельні приклади генерування синтетичних зразків 1-D сигналів при використанні датасету відкритого доступу MDDECT, що є першим етапом вирішення проблеми. Для практичної реалізації підходу розроблено спеціалізовану архітектуру 1D-DCGAN, що базується на використанні послідовності блоків транспонованих згорткових шарів та дилатованих згорткових блоків із коефіцієнтами розширення 1, 2 та 4. Таке структурне рішення дозволяє мережі ефективно сприймати як глобальну морфологічну форму 1-D сигналів, так і їхні локальні високочастотні компоненти без критичного збільшення кількості гіперпараметрів. Навчання моделі здійснювалося із використанням функції втрат, характерної для Wasserstein GAN-GP із градієнтним штрафом, що гарантує стабільність процесу сходження та запобігає проблемі колапсу мод в спостережуваному розподілі. Впроваджено механізм спектральної регуляризації безпосередньо у функцію втрат генератора через інтеграцію MSE-помилки між амплітудними спектрами реальних та синтезованих сигналів, що забезпечує спектральну точність генерованих зразків. Чисельні експерименти на датасеті MDDECT підтвердили, що використання спектральних втрат дозволило зменшити похибку відтворення зразків у частотній області на 82.8%. Якість навченого генератору верифіковано метрикою Maximum Mean Discrepancy, досягнуті показники якої свідчать щодо високої статистичної відповідності синтезованих даних реальним фізичним сигналам та придатність моделі для використання в ітераційних циклах реконструкції.

**Ключові слова:** Обернені задачі, регуляризація, генеративні моделі штучного інтелекту, відновлення параметрів, генеративні змагальні мережі, латентний простір

# SOLVING INVERSE PROBLEMS USING GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS

**Stankevych O., Halchenko V., Trembovetska R., Tychkov V.**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** An approach is proposed for using generative adversarial networks - GANs to form the space of possible solutions to inverse problems in indirect measurements, which ensures the correct application of gradient optimization techniques for determining the sought-after parameters of the properties of objects of observation, taking into account the specific structure of the landscape of the low-dimensional latent space of their encoding. Specific numerical examples of generating synthetic samples of 1-D signals using the open-access MDDECT dataset are presented, which is the first step in solving the problem. For the practical implementation of the approach, a specialized 1D-DCGAN architecture was developed, based on the use of a sequence of transposed convolutional layers and dilated convolutional blocks with dilation factors of 1, 2, and 4. This structural solution allows the network to effectively capture both the global morphological shape of 1-D signals and their local high-frequency components without a critical increase in the number of hyperparameters. The model was trained using a loss function characteristic of the Wasserstein GAN-GP with a gradient penalty, which ensures the stability of the convergence process and prevents the problem of mode collapse in the observed distribution. A spectral regularization mechanism was implemented directly into the generator's loss function by integrating the MSE error between the amplitude spectra of real and synthesized signals, ensuring the spectral accuracy of the generated samples. Numerical experiments on the MDDECT dataset confirmed that the use of spectral loss reduced the error in sample reproduction in the frequency domain by 82.8%. The quality of the trained generator was verified using the Maximum Mean Discrepancy metric, whose results indicate a high statistical correspondence between the synthesized data and real physical signals, as well as the model's suitability for use in iterative reconstruction cycles.

**Keywords:** inverse problems, regularization, generative AI models, parameter reconstruction, generative adversarial networks, latent space.

**Вступ.** Тенденція загострення уваги до підходів розв'язання обернених задач набула чіткої вираженості в останні роки в багатьох сферах науки та техніки, що викликано новими можливостями подолання існуючих багаточисельних проблем, вирішення яких мають суттєве практичне значення. Загалом обернена задача полягає у використанні фактичного результату деяких спостережень для визначення значень певних параметрів, що характеризують об'єкт досліджень. Отже, непрямі вимірювання також підпадають під це визначення. Наприклад, такою задачею є визначення профілю глибини поверхневих дефектів за сигналом накладного вихрострумового перетворювача при скануванні об'єкту контролю. Складність рішення оберненої задачі полягає у відсутності єдиного унікального розв'язку, оскільки вона має їх декілька, фактично нескінченну кількість, тобто характеризується як некоректно поставлена. На цей час відомими є значна кількість методів розв'язання обернених задач як вже класичних, так і більш сучасних, які базуються на використанні моделей, керованих даними. Нові підходи дозволяють досягти певних переваг над використанням класичних регуляризаційних методів забезпечення стійкості процесу розв'язання. Проте успіхи розвитку методів глибокого машинного навчання, зокрема генеративних моделей штучного інтелекту, стимулювали подальші дослідження в цьому напрямку. Позитивний досвід використання подібної запропонованій методології розв'язання обернених задач при непрямих вимірюваннях, але в латентному просторі скороченої розмірності із застосуванням лінійних перетворень в рамках методу PCA, а також нелінійних перетворень техніками методу Kernel PCA та без використання генеративних моделей, отримано безпосередньо авторами цієї статті у попередніх дослідженнях. Тому це дослідження є подальшим розвитком попередніх, де існують виправдані сподівання покращення ефективності пошуку розв'язків задачі внаслідок використання генеративних моделей штучного інтелекту.

**Мета роботи**. Метою дослідження є створення оптимізаційного підходу розв'язання обернених задач за виміряним відгуком із застосуванням генеративно-змагальних мереж, а саме його первинної основної складової, спрямованої на генерацію синтетичних якісних зразків 1-D властивостей об'єкту спостереження у формі реальних даних закодованих в неперервному латентному просторі низької розмірності для багаторазової симуляції в рамках ітераційного процесу їх реконструкції.

**Постановка задачі**. Математично сформулюємо в загальному вигляді оптимізаційний підхід розв'язання обернених задач із використанням GAN. Задача зводиться до мінімізації функції нев'язки між фізичним оператором прямої задачі, застосованим до згенерованого зразка, та виміряним значенням відгуку об'єкта. При цьому оптимізація ведеться по вектору дійсних змінних латентного простору невеликої розмірності (порядку 10-32). Генератор GAN виступає як глибока нейронна мережа, що відображає цей низькорозмірний латентний вектор у простір зразків великої розмірності (порядку від сотень до десятків тисяч). Часто виправданим є використання $L_2$-регуляризації норми латентного вектору додаванням до цільової функції додаткового члена. При цьому латентний вектор обмежується з метою утримання розв'язків у області, адекватно представленій у процесі навчання. Задача оптимізації може бути класифікована як сильно нелінійна, кусочно-гладка, неопукла в просторі дійсних змінних незначної розмірності, некоректно поставлена, проте регуляризована через апріорі обмежений многовид, тобто топологічний простір, який локально має характер звичайного евклідового.

Для визначеності вважатимемо латентний простір абстрактним параметричним, в якому GAN кодує апріорні знання про допустимі зразки властивостей об'єкту, а латентні змінні мають стандартний нормальний розподіл. Відзначимо, що після початку оптимізації вектор латентних змінних стає керованим параметром відповідного алгоритму та вже не є випадковою змінною. Через неопуклу природу генератора GAN відповідна функція нев'язки

має множину локальних мінімумів, що обумовлює неоднозначність розв'язку. Висока розмірність простору 1-D зразків і складне нелінійне відображення латентних змінних у високорозмірний простір створюють складний ландшафт функції втрат GAN та є особливістю задачі. Після проведення оптимізації в латентному просторі необхідним є етап відображення знайденого латентного вектору, тобто координат точки на многовиді фізично коректних зразків властивостей, у простір високої розмірності, що однозначно виконується за допомогою навченого генератора. Відновлений зразок властивостей відповідає виміряному значенню відгуку об'єкта. Хоча пряме відображення з латентного простору у простір ознак є однозначним, обернене – неоднозначне. З цих причин різні стартові точки можуть призвести до різних допустимих реконструкцій, тому доцільними є багатостартові стратегії оптимізації.

**Вирішення проблеми**. В цих дослідженнях обмежимося практичною реалізацією лише першої, проте надзвичайно важливої, складової запропонованої методології, котра в результаті визначає успішність її застосування, а саме засобу генерації 1-D екземплярів властивостей об'єктів. Для цього скористаємося результатами дослідження, де розглядалася проблема оцінювання глибини дефекту та отриманий 1-D набір даних MDDECT (Metal Defects of different Depths by ECT) сканування об'єкту вихрострумовим перетворювачем, котрий є у відкритому доступі. MDDECT dataset застосовувався в якості реалістичних зразків сигналів для навчання GAN. Використовувалася її класична архітектура «генератор-дискримінатор». Задача полягала у побудові генератора, здатного продукувати нові екземпляри сигналів у високорозмірному неперервному просторі, які відображають приховані закономірності, що притаманні навчальному набору даних. Тобто GAN фактично забезпечує виконання функції генератора простору можливих розв'язків оберненої задачі.

Архітектура моделі базується на глибоких згорткових одновимірних нейронних мережах 1D-DCGAN. Генератор реалізований як послідовність блоків транспонованих згорткових шарів ConvTranspose1d, доповнених блоками дилатованих згорткових шарів з розширенням 1, 2 та 4. Таке рішення дозволяє мережі ефективно сприймати як глобальну форму сигналу, так і його локальні високочастотні компоненти без надмірного збільшення кількості її гіперпараметрів. У тренуванні GAN є складними, тому застосовувалася техніка стабілізації функції втрат додаванням Gradient penalty для забезпечення Ліпшицевої неперервності, тобто реалізовувалася Wasserstein GAN. Функція втрат дискримінатора включала оцінки середніх фейкових та реальних зразків, а також штраф за занадто швидку зміну оцінок. Зазначимо, що в модельному прикладі додатково до регуляризації латентного простору впроваджено механізм спектральної регуляризації, що здійснювалося інтеграцією у функцію втрат генератора відповідної складової. Це забезпечує примусове узгодження енергетичних спектрів синтезованих зразків із еталонними фізичними реальними, що мінімізує появу фізично не обґрунтованих осциляцій у генерованих сигналах. Функція втрат генератору визначалася формулою, що містила середньоквадратичну помилку (MSE) між амплітудними спектрами реальних та синтезованих сигналів, отриманих за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Спостерігалася позитивна динаміка зміни метрик під час навчання протягом 2000 епох: Spectral Loss MSE знизився від 137.0 до 23.6, тобто покращення склало 82.8%. Після виконання навчання генератор GAN застосовувався для тестового моделювання сигналів. При цьому продукування зразків синтетичних сигналів ініціювалося випадково сформованими векторами шуму. Отже, кожна нова точка в латентному просторі відповідала новому унікальному синтетичному сигналу, що наочно демонструє отримані можливості автоматичного перетворення обмеженого у обсязі датасету навчальних даних у нескінченний їх набір. Це дозволяє коректне виконання оптимізаційного процесу для розв'язання обернених задач. Порівняння пар графіків (синтетичний сигнал та найближчий реальний за MSE) демонструє високу візуальну схожість. Оцінювання коректності функціювання навченого генератора виконувалося визначенням відстані між розподілами реальних та згенерованих даних за допомогою ефективної для 1-D сигналів

метрики Maximum Mean Discrepancy. Низьке значення MMD рівне 0.005024 свідчить про те, що розподіл згенерованих даних статистично близький до реального розподілу.

**Висновок.** В дослідженні запропоновано інноваційний підхід розв'язання обернених задач при непрямих вимірюваннях параметрів об'єктів спостережень, який оснований на оптимізаційному алгоритмі пошуку екстремуму в низькорозмірному латентному просторі із використанням генеративно-змагальної мережі для якісного відтворення зразків властивостей об'єктів у неперервному високорозмірному просторі. Це забезпечується визначенням неявних статистичних розподілів навчальних наборів даних.

## Список використаних джерел


1. Arridge, S., Maass, P., Öktem, O., & Schönlieb, C. B. (2019). Solving inverse problems using data-driven models. *Acta numerica*, *28*, 1-174. https://doi.org/10.1017/S0962492919000059
2. Machhindranath M. Dhane, Shobhankumar D.M, Lakshmi Janardhana R.C, & Ramesh T. (2024) Accelerating inverse problem solutions with generative adversarial networks. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*. *31*(1), 365–375. https://doi.org/10.52783/cana.v31.6093
3. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R. V., & Tychkov, V. V. (2025). Computer-economical optimization method for solving inverse problems of determining electrophysical properties of objects in eddy current structroscopy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (1), 39–47. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.06
4. Meng, T., Tao, Y., Chen, Z., Avila, J. R. S., Ran, Q., Shao, Y., Huang R., Xie Y., Zhao Q., Zhang Z. & Yin, W. (2021). Depth evaluation for metal surface defects by eddy current testing using deep residual convolutional neural networks. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, *70*, 1-13. https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3117367

# ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

**Фурсова Т.М., Канюк Г.І., Василець Т.Ю., Мезеря А.Ю., Близниченко О.М.**
Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна

**Анотація**. У роботі розглянуто проблему точності автоматизованого визначення техніко-економічних показників енергетичних установок та її вплив на ефективність функціонування електростанцій. Об'єктом дослідження є формування техніко-економічних показників у автоматизованих системах керування енергоблоками, а предметом — похибки їх визначення в умовах динамічних режимів роботи. Метою дослідження є підвищення точності автоматизованого визначення техніко-економічних показників енергетичних установок електростанцій з урахуванням динамічних характеристик об'єктів керування. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: досліджено джерела інструментальних і методичних похибок, проаналізовано вплив динамічних властивостей об'єкта на точність визначення показників, а також розглянуто методи їх компенсації. У роботі використано методи математичного моделювання, аналізу похибок, теорії автоматичного керування та обробки експериментальних даних. Запропоновано підхід до зменшення динамічної похибки на основі застосування спрощеної динамічної моделі об'єкта у поєднанні з усередненням сигналів. Отримані результати на прикладі барабанного парогенератора Зміївської ТЕС показали, що використання динамічної моделі дозволяє суттєво підвищити точність визначення техніко-економічних показників. Зокрема, похибка розрахунку при малих інтервалах усереднення зменшується у декілька разів порівняно з традиційними методами. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення ефективності управління енергетичними установками та зниження експлуатаційних витрат.

**Ключові слова**: техніко-економічні показники, динамічна похибка, точність, керування, енергетична установка.

# ENHANCING THE ACCURACY OF AUTOMATED DETERMINATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC PERFORMANCE INDICATORS OF POWER PLANTS CONSIDERING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONTROL OBJECTS

**Fursova T.M., Kaniuk G.I., Vasylets T.Yu., Mezeria A.Yu., Blyznychenko O.M.**
V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses the problem of accuracy in the automated determination of technical and economic performance indicators of power plants and its impact on the efficiency of power station operation. The object of the study is the formation of technical and economic indicators in automated control systems of power units, while the subject is the errors in their determination under dynamic operating conditions. The aim of the study is to improve the accuracy of automated determination of technical and economic indicators of power plant installations, taking into account the dynamic characteristics of control objects. To achieve this aim, the following tasks are solved: the sources of instrumental and methodological errors are investigated; the influence of the dynamic properties of the object on the accuracy of indicator determination is analyzed; and methods for their compensation are considered. The study employs methods of mathematical modeling, error analysis, automatic control theory, and experimental data processing. An approach to reducing dynamic error is proposed based on the use of a simplified dynamic model of the object combined with signal averaging. The obtained results, demonstrated using the example of a drum-type steam generator of the Zmiiv Thermal Power Plant, show that the application of a dynamic model makes it possible to significantly improve the accuracy of determining technical and economic indicators. In particular, the calculation error at small averaging intervals is reduced several times compared to traditional methods. The practical significance of the work lies in its potential to improve power plant control efficiency and reduce operating costs.

**Keywords**: technical and economic indicators, dynamic error, accuracy, control, power plant.

**Вступ**. Сучасний розвиток енергетичної галузі супроводжується зростанням вимог до енергоефективності, надійності та екологічної безпеки функціонування теплових і атомних електростанцій. Забезпечення стабільності енергосистем, оптимізація витрат паливно-енергетичних ресурсів та зниження негативного впливу на довкілля безпосередньо залежать від якості управління енергетичними об'єктами.

Питання оцінювання техніко-економічних показників (ТЕП) енергетичних установок широко розглядається в сучасних дослідженнях. У роботах [1-3] показано, що техніко-економічні показники є ключовими критеріями ефективності роботи електростанцій і безпосередньо впливають на оптимізацію режимів їх функціонування. Дослідження [4-5] демонструють ефективність застосування моделей і методів онлайн-моніторингу для прогнозування технічного стану та показників роботи енергоблоків. Водночас стандарти [6-7] регламентують підходи до вимірювання та оцінки енергетичних параметрів, що забезпечує єдність методичної бази. Дослідники у [8-10] розглядають сучасні підходи до підвищення точності вимірювання електроенергії та надійності систем обліку, включаючи використання методів машинного навчання та аналізу даних.

Однак, процес автоматизованого визначення ТЕП супроводжується похибками, що виникають на етапах вимірювання, передачі, обробки та інтерпретації технологічної інформації. Особливо актуальною є проблема динамічної похибки, яка виникає при розрахунку показників у темпі технологічного процесу внаслідок інерційності енергетичних об'єктів і вимірювальних каналів. Незважаючи на значну кількість досліджень, питання урахування динамічних похибок при автоматизованому визначенні техніко-економічних показників залишається недостатньо розкритим. Це обумовлює необхідність удосконалення методів автоматизованого визначення ТЕП з урахуванням динамічних характеристик об'єкта.

**Метою роботи** є підвищення точності автоматизованого визначення техніко-економічних показників енергетичних установок електростанцій з урахуванням динамічних характеристик об'єктів керування.

**Формулювання проблеми**. Однією з ключових проблем автоматизованих систем визначення техніко-економічних показників є наявність сукупності інструментальних та методичних похибок. При зменшенні періоду розрахунку та переході до визначення показників технологічних процесів особливо проявляється динамічна похибка, яка виникає через запізнення сигналів та інерційність об'єкта керування. Унаслідок цього розраховані значення ТЕП не відповідають реальному стану об'єкта, що призводить до зниження точності оцінки ефективності обладнання та економічної ефективності електростанції.

**Розв'язання проблеми**. Для компенсації динамічної похибки авторами розглянуто два основні підходи:

1. Усереднення результатів розрахунку. Це найпростіший підхід, що дозволяє зменшити випадкові коливання та частково компенсувати вплив динамічних ефектів. Недоліком методу є зниження оперативності визначення показників, що обмежує його застосування в системах оперативного керування.

2. Використання динамічної моделі об'єкта. Більш ефективним є застосування динамічної моделі об'єкта в розрахунках. Це дозволяє врахувати інерційність технологічних процесів та скоригувати значення показників.

У роботі запропоновано комбінований підхід. На першому етапі оцінюється похибка окремого динамічного каналу; на другому етапі модель представляється у вигляді сукупності окремих динамічних каналів між параметрами, що входять до формули розрахунку показника.

Запропонований метод було застосовано для розрахунку ККД барабанного парогенератора Зміївської ТЕС як критерію оптимізації процесу горіння. Використання спрощеної моделі у вигляді однієї ємнісної ланки дозволило скоротити період розрахунку до 5 хвилин та зменшити похибку розрахунку.

Отримані результати показали, що для періоду розрахунку 5 хв без використання моделі похибка становить 0,4 %; з використанням моделі — 0,075 %.

Для 1 години: без моделі — 0,08 %; з моделлю — 0,01 %.

Таким чином, використання динамічної моделі суттєво підвищує точність визначення техніко-економічних показників.

**Висновки**:

1. Встановлено, що точність автоматизованого визначення техніко-економічних показників є важливим фактором ефективного функціонування електростанцій.

2. Основними джерелами похибок є інструментальні та методичні похибки, серед яких особливе значення має динамічна похибка. Використання традиційних розрахункових формул без урахування динамічних властивостей об'єкта призводить до суттєвого спотворення результатів.

3. Найбільш ефективним методом компенсації динамічної похибки є використання спрощених динамічних моделей у поєднанні з усередненням результатів.

Практичне застосування запропонованого підходу для барабанного парогенератора Зміївської ТЕС підтвердило можливість суттєвого зменшення похибки розрахунку та скорочення періоду визначення показників.

Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні автоматизованих систем керування енергетичними установками.

## Список використаних джерел


1. Oprea, S., Bâra, A. Key technical performance indicators for power plants. In: Recent Improvements of Power Plants Management and Technology, pp. 1–24. IntechOpen, London (2017). https://doi.org/10.5772/67858
2. Kravets, T., Miroshnychenko, Y., Kapustianskyi, A. Enhancement of technical and economic indicators of power-generating units of thermal power plants. Journal of Energy Engineering and Control Systems. 7(1), 26–34 (2021). https://doi.org/10.23939/jeecs2021.01.026
3. Lin, B., Zhu, J. An updated assessment of technical efficiency of electric power plants. Energy Policy 140, 111896 (2020). https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111896
4. Petukhov, A., et al. Calculation and analysis of technical and economic indicators of the NPP power unit. IFAC-PapersOnLine. 56(2), 1181–1186 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1181
5. Sun, H., Nikovski, D.: Online monitoring and prediction of power plant performance using machine learning. Energy and AI. 5, 100058 (2021). https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100058
6. International Electrotechnical Commission: IEC 61724-1:2017 Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. IEC, Geneva (2017). https://doi.org/10.3403/30322567
7. IEEE: IEEE Std 1459-2010: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non-sinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. IEEE, New York (2010). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063
8. Zhang, B., Xia, X., He, C., Zhou, Y. Performance calibration in smart power system electricity metering using LSTM. Frontiers in Energy Research. 12, 1405725 (2024). https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1405725
9. Vasylets, K., Vasylets, S., Kylymchuk, A. Research on accuracy of electrical energy measurement in microgrid systems. Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions 6, 23–28 (2022). https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002696
10. Antypov, I., Kryvonosov, V., Petrenko, A., Holub, O. Assessment of reliability of technical electricity metering. Energy and Automation 5 (75), 40–49 (2024). https://doi.org/10.31548/energiya5(75).2024.040

# A REVIEW OF ARCHITECTURAL OPTIMIZATION METHODS FOR MULTILINGUAL LARGE LANGUAGE MODELS: THE CHALLENGE OF SEMANTIC COHERENCE RETENTION

**Andriievskyi D.O.**
Kharkiv National University of Radio Electronics (NURE), Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** This report reviews modern architectural optimization methods for multilingual Large Language Models (LLMs), especially their impact on maintaining semantic coherence while mitigating the "Curse of Dimensionality." As modern models aim to support over 100 languages, the resulting high-dimensional vector representations create significant bottlenecks in memory consumption and search latency. This study synthesizes a couple of dimensionality reduction techniques, including Neural Autoencoders, Product Quantization (PQ), and Matryoshka Representation Learning (MRL). The primary objective is to evaluate these methods' ability to preserve cross-lingual semantic alignment – ensuring concepts remain similar across languages – while achieving computational efficiency. The analysis concludes that architectural innovations like MRL provide a superior engineering trade-off by enabling dynamic truncation of embeddings with minimal loss of semantic integrity, thereby facilitating scalable, real-time Retrieval-Augmented Generation (RAG) systems.

**Keywords:** Multilingual LLMs, Semantic Coherence, Dimensionality Reduction, Matryoshka Representation Learning, Vector Embeddings, Cross-lingual Alignment.

**Introduction.** Today's natural language systems rely heavily on dense vectors to capture meaning. Models like GPT-4, Llama, and XLM-RoBERTa turn words into points in a high-dimensional space ($\mathbb{R}^d$). Because positions reflect relationships, closeness often means similarity. Instead of exact matches, these models use angles - measured by Cosine Similarity - to judge how ideas relate across languages. Yet tension remains: richer representations demand more resources. While accuracy improves with detail, processing speed tends to drop. Balancing depth with efficiency becomes unavoidable. Precision fights against practical limits. Even advanced designs face this trade-off. The gap between ideal encoding and real-world performance persists. Despite progress, the core challenge remains unsolved. Spreading across more than a hundred tongues, subtle word meanings and intricate forms push vector sizes past the old limits - once stuck near 300 to 768 - now stretching into 3072 or higher. As these dimensions balloon, space itself thins out fast; distances blur when examples scatter too far apart in vast hyper-volumes, making measurements shaky at best.

**The purpose of the work.** The objective of this research is to evaluate methodologies for reducing vector dimensionality while preserving "semantic coherence" – the cross-lingual equivalence where the Ukrainian "кіт" and the English "cat" maintain near-identical relative coordinates in the latent space.

**Formulation of the problem.** At the heart of this issue is how distance behaves as dimensionality increases. As $d \to \infty$, distances to data points shift in a surprising way. Instead of clear differences, the gap between closest and furthest points shrinks relative to the shortest one. This pattern emerges clearly. With more dimensions, that ratio trends toward zero - slowly at first, then sharply:

$$\lim_{d\to\infty} \frac{\max dist(q, x_i) - \min dist(q, x_i)}{\min dist(q, x_i)} \to 0$$

.

Because of this effect, methods like KNN struggle to distinguish meaningful neighbors. All items appear nearly the same distance from the query. So, picking near ones becomes almost meaningless. Geometry itself changes shape under such conditions. Distance loses its power to separate instances. That makes retrieval based on proximity unreliable. High dimensionality alters fundamental assumptions behind similarity search. Holding 10 million documents in memory, each

represented by a 1536-element vector at four bytes per number, demands around 60 gigabytes - before any extra structures are added [3]. When more tongues get folded into one shared space, meanings start overlapping if capacity stays flat - a problem known as the Curse of Multilinguality [2]. One common reaction? Pushing up dimension size $d$, yet that ramps up hardware needs further. Instead of growing outward, progress may come from pruning inward: keeping only those axes richest in meaning, so multilingual search remains fast and lean.

**Solving the problem.** Shifts now favor building compression into models from the start. Leading methods prove their worth through consistent results rather than promises. What stands out works silently within structure instead of piling on extras.

Because autoencoders rely on an encoder-decoder setup, they detect complex patterns without assuming linearity. When the system reduces the error measured by $\mathcal{L}_{AE} = ||x - \hat{x}||^2$, it forms compressed internal states capturing essential meaning across languages. These compact representations maintain structural similarity between different languages far better than PCA ever could.

Despite its role in large-scale search systems, Product Quantization operates through compact representation rather than dimensional reduction. Instead of shrinking vector size, it trades numerical precision - switching formats like float32 into int8. Memory demand drops this way sharply, often exceeding a 75% cut. Computation scales more gently too, sidestepping the usual linear rise in cost per dimension [3].

Among recent advances, Matryoshka Representation Learning stands out by using layered embedding structures - here, core meaning occupies just the earliest dimensions [4]. Such a design means a full 1536-element vector naturally embeds a working 256-length version upfront. Inside these arrangements, shorter forms emerge without retraining. The structure unfolds like nested dolls: larger vectors wrap smaller ones seamlessly.

Reducing vector size from 1536 to 256 dimensions via MRL slashes memory needs - for 10 million records, RAM drops from 60GB to just 10GB - while speeding up searches sixfold, all without added projection steps [3]. Because of these efficiency leaps, tools like OpenAI's text-embedding-3-large let users pick output sizes, say 256 or 3072, adjusting precision against expense in real time [4]. Though built differently, both MRL and PQ unlock major improvements in how resources are used. Behind the scenes, smaller vectors mean faster responses and lighter loads. Flexibility becomes possible when systems adapt structure based on demand. Efficiency here does not come at the cost of performance. Instead, it redefines what trade-offs look like under pressure.

**Conclusion.** Dimensionality reduction is an engineering necessity for the deployment of production-grade AI. Matryoshka Representation Learning (MRL) and Neural Autoencoders offer the most robust path for maintaining semantic coherence in multilingual LLM applications. By baking compression into the architecture, these methods enable 6x faster search and an 80% reduction in memory overhead, providing the foundational efficiency required for real-time RAG systems and global-scale classification.

## References


1. Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, USA: O'Reilly Media, 2017.
2. Conneau, K. Khandelwal, N. Goyal, V. Chaudhary, G. Wenzek, F. Guzmán, E. Grave, M. Ott, L. Zettlemoyer, and V. Stoyanov, "Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale," in Proc. 58th Annu. Meeting Assoc. Comput. Linguistics (ACL), 2020, pp. 8440–8451
3. J. Johnson, M. Douze, and H. Jégou, "Billion-scale similarity search with GPUs," IEEE Trans. Big Data, vol. 7, no. 3, pp. 535–547, Jul. 2021.
4. Kusupati, G. Bhatt, A. Rege, M. Wallingford, A. Sinha, V. Ramanujan, W. Howard-Snyder, K. Chen, S. Kakade, P. Jain, and A. Farhadi, "Matryoshka Representation Learning," in Proc. Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS), vol. 35, 2022, pp. 30233–30249. URL: https://arxiv.org/abs/2205.13147
5. L. McInnes, J. Healy, and J. Melville, "UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction," 2018, arXiv:1802.03426. URL: https://arxiv.org/abs/1802.03426

# AI-AUGMENTED CONCEPTUAL MODEL OF COMPROMISE INTEREST BALANCING AMONG INSURANCE MARKET PARTIES

**Badri Gechbaia[1], Budiukov Y.[2], Lobach O.[2], Romanenkov Y.[3], Kharuta V.[4]**

[1]Batumi Shota Rustaveli State University, Batumi, Georgia
[2]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[3]Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
[4]National Transport University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** An AI-augmented conceptual model of compromise interest balancing among insurance market parties (the insurance agent, the client, and the regulator) is proposed, based on Quality Function Deployment (QFD) methodology. In the model, the agent's goals (commission rate, number of transactions, low chargeback rate, licence security) serve as WHATs requirements, while the mechanisms for their achievement (HOWs) are represented by two groups of means: satisfying client needs and complying with regulatory standards. A five-stage AI-QFD model is developed with clearly defined integration points for four artificial intelligence tools. The model enables objective formation of the "requirements–actions" matrix based on real data, replacing expert assumptions with measurable indicators and achieving a balance among agent profitability, client satisfaction, and regulatory compliance. It is demonstrated how the AI layer transforms the classical two-dimensional QFD matrix into a three-dimensional decision-support instrument for investment and insurance decisions.

**Keywords:** quality function deployment, artificial intelligence tools, AI-QFD, insurance agent, insurance, InsurTech, performance criteria, decision support.

**Introduction.** The contemporary annuity insurance market is characterized by a structural conflict of interests among the insurance agent (maximization of commission income), the client (optimal protection at an acceptable price), and the regulator (ensuring suitability and consumer protection) [1].

A systematic review of AI applications in annuity sales business processes [2] revealed uneven technological maturity across available solutions and the absence of a formalized instrument for aligning the interests of these parties. The classical QFD model serves as an effective tool for mapping consumer requirements to product characteristics [3]; however, it lacks a mechanism for the simultaneous consideration of conflicting requirements from multiple parties and relies on subjective expert assessments, which constrains its application in insurance processes where regulatory compliance and recommendation transparency are paramount. To overcome these limitations, AI-QFD is proposed – an augmented model in which the agent's goals serve as WHATs requirements, while client needs and regulatory standards constitute the HOWs mechanisms for their achievement. This approach replaces subjective assessments with data from specialized AI tools and introduces a three-dimensional matrix structure through multi-source evaluation.

**Formulation of the problem.** To develop a conceptual AI-QFD model that simultaneously addresses both limitations of classical QFD in the context of the annuity insurance market: first, to replace subjective completion of the relationship matrix $R_{ij}$ with objective assessments from specialized AI tools; second, to provide a structured representation of dual-perspective logic – whereby the insurance agent's goals (WHATs) are achieved through client need satisfaction and regulatory compliance (HOWs). The model must be suitable for subsequent mathematical formalization and verification on real agent data.

**The purpose of the work.** To develop a conceptual AI-augmented QFD model that addresses the limitations by integrating artificial intelligence at all stages of QFD construction, and that provides a structured representation of the mechanisms through which the insurance agent's goals are achieved via client needs and regulatory standards within a unified matrix.

**Solving the problem.** The construction of the AI-QFD model is proposed to proceed through five sequential stages corresponding to the classical QFD structure [3], with mandatory integration of four specialized AI tools: LLM assistant, Rate Aggregator, Suitability Checker, and Compliance Monitor.

Stage 1. Formalization of WHATs (insurance agent goals). This stage involves the collection and structuring of key agent performance criteria: income per hour, average commission, number of deals per month, chargeback rate, license safety, referral rate, and repeat purchase rate. AI tool: the LLM assistant performs automatic structuring of the agent's informal goals, identification of implicit criteria, and generation of a complete standardized WHATs list.

Stage 2. Assignment of WHATs weights. Weight coefficients are assigned to agent goals, taking into account two external constraints – client needs and regulatory standards. AI tools: Suitability Checker verifies that the proposed weights do not conflict with regulatory minimums for suitability; Compliance Monitor flags chargeback rate and license safety as non-reducible criteria.

Stage 3. Formation of HOWs (mechanisms for achieving agent goals). HOWs are structured into two groups: through client need satisfaction (client intake, income gap analysis, risk tolerance, liquidity timeline, asset analysis, carrier due diligence, etc.) and through regulatory compliance (suitability analysis, conflict of interest disclosure, NIGO control, written rationale, chargeback risk, etc.). AI tools: the Rate Aggregator gathers current rates for client-oriented HOWs; the LLM assistant generates client-oriented documentation and automated written rationales for regulatory HOWs.

Stage 4. Construction of the relationship matrix $R_{ij}$. Assessment of the strength of association between each agent goal (WHATs) and each achievement mechanism (HOWs) across two blocks (client, regulator). Key innovation: instead of subjective symbols (●◎△·), all four AI tools independently evaluate each cell using SHAP-based interpretation [4] the final $R_{ij}$ value is formed as a weighted aggregation accounting for the contribution of each AI tool.

Stage 5. Calculation of technical priorities $TI_j$ and generation of recommendations. Priorities of HOWs mechanisms are computed, and results are verified. AI tools: the Compliance Monitor ensures that no regulatory mechanism falls below the normative threshold [5]; the LLM assistant automatically generates a written rationale based on the final ranking. In the resulting model, regulatory mechanisms take the top positions, thereby confirming the model's compliance-protection function for the agent.

**Conclusions.** The developed five-stage AI-augmented conceptual QFD model transforms the classical requirements alignment tool into a modern three-dimensional decision-support mechanism for the annuity insurance market. The key feature of the model is its dual-perspective representation: agent goals (WHATs) are achieved through client satisfaction and regulatory compliance (HOWs). The integration of specialized AI tools at each stage ensures objectivity of assessments, automated verification of compliance constraints, and generation of evidence-based recommendations. The model is suitable for subsequent mathematical formalization and empirical verification using real agent data.

## References


1. Habib M., Mourad N.: AI revolution in insurance: bridging research and reality. Frontiers in Artificial Intelligence, 8, 1568266, (2025). DOI: 10.3389/frai.2025.1568266
2. Budiukov Y., Lobach O. Zastosuvannya shtuchnoho intelektu v biznes-protsesakh prodazhu anuyitetiv nezalezhnymy strakhovymy ahentamy [Application of artificial intelligence in business processes of annuity sales by independent insurance agents]. Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Ser.: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfeliamy, prohramamy ta proektamy: zb. nauk. pr. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025, no. 2(11), pp. 8–22.
3. Basnet P., Li L.: Enhancing product and service development through AI-integrated Quality Function Deployment. Research in Engineering Design, 37(4), (2026). DOI: 10.1007/s00163-025-00467-9
4. Černo V., Kabašinskas A.: Explainable artificial intelligence (XAI) in finance: a systematic literature review. Artificial Intelligence Review, 57, 216, (2024). DOI: 10.1007/s10462-024-10854-8
5. NAIC: Model Bulletin on the Use of Artificial Intelligence by Insurance Companies. National Association of Insurance Commissioners, (2023). URL: https://content.naic.org/insurance-topics/artificial-intelligence

# MODELING MEDIEVAL FIGHTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

**Bilous V. [1], Bodnenko D.[1], Horbatovskyi D.[1], Osadchyi V.[1], Osadcha M.[2]**
[1]Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine,
[2]Mito Kiryo High School, Mito, Japan

**Abstract**. The paper addresses the problem of computer simulation of medieval duels as complex dynamic systems, where the outcome is determined by the interaction of physical, technical, and behavioral factors. The study justifies the use of agent-based simulation and artificial intelligence algorithms for formalizing combat interaction between autonomous agents. A parametric model of a knightly duel is proposed, in which each participant is described by a set of key attributes: level of protection, weapon type, presence of a shield, and level of combat training. Based on these parameters, a discrete combinatorial space of possible scenarios is constructed, enabling statistical analysis of combat outcomes. Special attention is paid to the application of Monte Carlo methods and reinforcement learning algorithms for modeling decision-making under uncertainty. The proposed approach can be employed in historical digital reconstruction, development of interactive simulations and game systems, as well as in studying combat models using modern information technologies. The formalism supports both exhaustive scenario enumeration and selective simulation experiments, providing a quantitative framework for analyzing the impact of equipment, training, and tactics on the probability of victory.

**Keywords**: Computer Modeling, Medieval Duel, Artificial Intelligence, Agent-Based Simulation, Monte Carlo Method, Autonomous Agents, Reinforcement Learning, Digital Reconstruction.

**Introduction**. Combat engagement modeling belongs to the class of complex dynamic problems, where the result is shaped not by a single factor, but by a combination of physical, technical, spatial, and behavioral parameters. In contrast to classical mechanical systems that can be described by deterministic equations, a duel between two participants exhibits a stochastic character. The outcome is influenced by weapon type, level of protection, reaction speed, endurance, distance, tactical choices, and the likelihood of random events during the interaction.

In the context of historical reconstructions, military-historical analytics, and the development of interactive simulations, there is a growing need for models capable of formalizing the behavior of combat participants, quantitatively assessing the influence of individual parameters, and reproducing outcome variability under different initial conditions [1-3]. Medieval duels pose a particular challenge, as they combine historical data on equipment and fighting techniques with the requirement for rigorous mathematical and algorithmic interpretation. Modern information technologies enable the treatment of a duel as an agent-oriented system, in which each participant is endowed with a distinct set of attributes, action possibilities, and decision-making rules. Under these conditions, the application of simulation methods – especially Monte Carlo – along with artificial intelligence algorithms, offers a promising way to model agent behavior under uncertainty and to explore alternative combat strategies.

**The purpose of the work** is to develop a methodological approach to the computer simulation of medieval duels based on a parametric model of combat interaction and on the application of artificial intelligence algorithms. The approach should allow analyzing the impact of equipment (armor, weapon type, shield), level of training, and tactical decisions on the outcome of simulated combat encounters [4-7]. In particular, the study aims to create a formal framework that supports both combinatorial scenario exploration and adaptive agent behavior, enabling quantitative historical analysis and the design of interactive simulation environments.

**Formulation of the problem.** Despite the availability of historical sources describing medieval combat practices, fencing techniques, and weaponry, their direct use in computer modeling remains limited. The core problem lies in the difficulty of translating qualitative historical descriptions into a formal, algorithmic model suitable for computational analysis. Existing digital simulations and game systems often rely on simplified combat mechanics in which parameters such as armor, weapon, shield, or training level are treated as abstract numerical coefficients [8-14]. Such

simplifications usually do not allow one to systematically study how the variation of a specific parameter affects the outcome of a duel.

Consequently, there is a demand for a formalized model that:

- supports controlled variation of initial conditions;
- enables statistical analysis of combat outcomes across multiple simulation runs;
- allows integration of decision-making algorithms (including AI-based strategies);
- is compatible with broader digital reconstruction and educational applications.

In this context, the challenge is to design a parameterized formalism that is both historically grounded and computationally tractable, bridging the gap between descriptive historical knowledge and quantitative simulation methodology.

**Solving the problem.** To formalize the medieval duel, an agent-based parametric model is proposed. Each combatant is represented by four main attributes:

1. **Level of protection** – characterizing the agent's ability to reduce incoming damage, with potential trade-offs in mobility and reaction speed.
2. **Weapon type** – defining the interaction range, attack frequency, and potential damage efficiency.
3. **Presence of a shield** – introducing an additional defensive parameter that modifies the probability of blocking an attack.
4. **Level of combat training** – treated as a generalized coefficient affecting action accuracy, defensive efficiency, and tactical choices.

The model assumes discrete values for each parameter:

- level of protection – 4 values;
- weapon type – 5 values;
- presence of a shield – 2 values (yes/no);
- level of combat training – 2 values.

The number of possible configurations for a single fighter is then

$$N = 4 \times 5 \times 2 \times 2 = 80.$$

For a pair of independent duelists, the total number of initial configuration pairs is

$$N_{total} = 80 \times 80 = 6400.$$

This combinatorial state space allows for both exhaustive scenario analysis and selective simulation experiments, in which subsets of configurations are systematically varied according to predefined experimental designs. A series of simulations can be used to estimate the probability of victory, average combat duration, attack efficiency, and other indicators for each configuration.

In particular, the Monte Carlo method is employed to account for the stochastic nature of combat interaction. Each scenario can be repeated multiple times, and results are aggregated via statistical measures: win rates, average fight duration, attack success rates, successful blocks, or the evolution of an agent's state during the duel. This approach shifts the focus from singular outcomes to probabilistic patterns, facilitating a quantitative assessment of how equipment, training, and tactics influence the likelihood of success.

To extend the model beyond predefined rule-based behavior, artificial intelligence techniques are integrated, especially reinforcement learning. Under this framework, agents do not merely execute fixed action sequences but adapt their behavior based on feedback from previous encounters. This enables the comparison of different tactical strategies, identification of efficient behavioral patterns, and analysis of decision-making in dynamically changing combat environments.

From a software perspective, the proposed information system can include the following modules:

- fighter parameterization module (attribute definition and configuration management);
- scenario generation module (creation of combat setups from the combinatorial space);
- simulation engine (core logic for combat execution and outcome tracking);
- results database (storage of simulation runs and statistics);

– visualization module (graphical representation of duels).

The visualization component can be implemented using modern game engines such as Unity or Unreal Engine, thereby combining the mathematical model with visually rich reconstructions of historical combat scenes (Fig.1). This integration supports both scholarly analysis (parameter sweeps, strategy comparisons) and educational or entertainment applications.



Fig. 1. Examples of simulation scenes from the game engine. The simulation shows the left knight readying to attack, and the right knight is preparing to deflect an incoming attack with his shield

The combat is simulated in discrete time with a step of $\Delta t = 0.1$ s and a maximum duration of up to 300 s. At each step, the agent has a state that includes distance, attack angle, health, stamina, last action, and available behavior options. The agent's actions are represented by the set: attack, block, dodge, move_forward, move_back, and wait. In the rule-based mode, the decision is made according to heuristics, and in the AI-agent mode, the policy chooses the action that maximizes the expected reward.

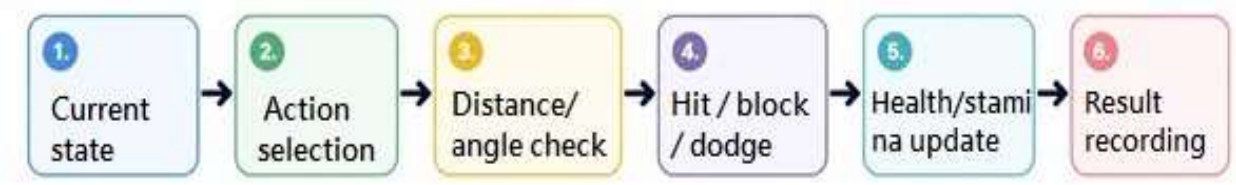



Fig. 2. Generalized combat event processing cycle in discrete simulation

The simulation episode begins with the initialization of two agents. Armor, Weapon, Shield, and Fencing are specified for each. After that, the derived characteristics are calculated: maximum speed, starting stamina, basic accuracy, optimal distance, damage absorption coefficient, and reaction delay. Thus, a short configuration like A2W4S1F1 expands into a full fighter behavior profile.

The experimental part checks not one illustrative example, but the stability of the model on different classes of scenarios. For this, 21 scenarios were used: 5 control symmetric, 10 partially asymmetric, and 6 fully asymmetric. Each scenario is repeated 1000 independent Monte Carlo

iterations with different seeds. This approach allows us to evaluate not a single result, but a probability distribution: victory A, victory B, draw, average duration of the fight, frequency of successful strikes, effectiveness of blocks and exhaustion.

**Conclusion.** The paper proposes a methodological framework for the computer simulation of medieval duels based on a parametric agent-oriented model. The key attributes influencing the simulation outcomes – level of protection, weapon type, presence of a shield, and level of combat training – are formally defined and embedded into a combinatorial state space of 6400 possible configurations for two duelists. Using this structure, the approach allows a transition from descriptive reenactment of medieval combat to a formalized, simulation-based analysis.

Monte Carlo methods provide a sound statistical basis for interpreting results across multiple runs, while integration of artificial intelligence, particularly reinforcement learning, enables the modeling of adaptive agent behavior and the exploration of tactical strategies. The proposed framework has potential applications in historical digital reconstruction, the development of game-oriented combat systems, training simulators, and broader research on decision-making models in complex, dynamic environments. Future work may involve expanding the parameter space, incorporating spatial and terrain effects, and validating the model against historical case studies or expert-based combat reconstructions.

## References


1. Hua, W., Fan, L., Li, L., Mei, K., Ji, J., Ge, Y., Hemphill, L., & Zhang, Y. (2023). War and Peace (WarAgent): Large Language Model-based Multi-Agent Simulation of World Wars. ArXiv, abs/2311.17227. https://doi.org/10.48550/arxiv.2311.17227.
2. Davis, P. K., & Bracken, P. (2025). Artificial intelligence for wargaming and modeling. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 22(1), 25-40.
3. Lee, D., Kim, M., & Ahn, C. (2021). Predicting combat outcomes and optimizing armies in StarCraft II by deep learning. Expert Syst. Appl., 185, 115592. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115592.
4. Black, S., & Darken, C. (2024). A multimodel approach to modeling intelligent combat behaviors for wargaming, 13051, 130510R - 130510R-11. https://doi.org/10.1117/12.3015088.
5. Stanescu, M., Barriga, N., & Buro, M. (2021). Using Lanchester Attrition Laws for Combat Prediction in StarCraft, 86-92. https://doi.org/10.1609/aiide.v11i1.12780.
6. Kitchen, S., McGroarty, C., & Aris, T. (2023). Model Representation Considerations for Artificial Intelligence Opponent Development in Combat Games. The International FLAIRS Conference Proceedings. https://doi.org/10.32473/flairs.36.133571.
7. Zhang, J., & Xue, Q. (2020). Actor–critic-based decision-making method for the artificial intelligence commander in tactical wargames. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 19, 467 - 480. https://doi.org/10.1177/1548512920954542.
8. Davis, P., & Bracken, P. (2022). Artificial intelligence for wargaming and modeling. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 22, 25 - 40. https://doi.org/10.1177/15485129211073126.
9. Wei, Y., Jiang, N., Zhang, Z., Zeng, M., & Yang, Z. (2022). Research on combat simulation agent modelling methods combined with reinforcement learning. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 44, 1625 - 1636. https://doi.org/10.3233/jifs-213222.
10. Black, S. (2024). Mastering the Digital Art of War: Developing Intelligent Combat Simulation Agents for Wargaming Using Hierarchical Reinforcement Learning. ArXiv, abs/2408.13333. https://doi.org/10.48550/arxiv.2408.13333.
11. Black, S., & Darken, C. (2024). Scaling Intelligent Agents in Combat Simulations for Wargaming. ArXiv, abs/2402.06694. https://doi.org/10.48550/arxiv.2402.06694.
12. Dimitriu, A., Michaletzky, T., Remeli, V., & Tihanyi, V. (2024). A Reinforcement Learning Approach to Military Simulations in Command: Modern Operations. IEEE Access, 12, 77501-77513. https://doi.org/10.1109/access.2024.3406148.
13. Stanescu, M., Barriga, N., & Buro, M. (2021). Using Lanchester Attrition Laws for Combat Prediction in StarCraft. , 86-92. https://doi.org/10.1609/aiide.v11i1.12780
14. Hutsul, V. (2018). FENCING TREATISE FIORE DEI LIBERI DA PRIMARIACCIO "FLOWER OF BATTLE" AND KNIGHTLY COMBAT PRACTICES OF THE SECOND HALF OF THE 14TH–FIRST THIRD OF THE 15TH CENTURY. Scientific Bulletin of Uzhgorod University. Series: History, 2 (39), 66-74.

# ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED SOCCER BALL DETECTION: COMPARATIVE ANALYSIS OF ATTENTION MECHANISMS AND THEIR PLACEMENT

**Bishyr S.[1], Ivasenko I.[1,2], Lapychak I.[3]**
[1]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[2] Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[3] Lviv State University of Physical Culture, Lviv, Ukraine

**Abstract**. Accurate detection of the soccer ball in video footage remains a challenging task due to its small size, rapid motion, and frequent occlusion by players. Yet, it is essential for performance analysis and tactical evaluation in modern football analytics. This study examines the effectiveness of integrating attention mechanisms into a baseline Single Shot MultiBox Detector (SSD) with a VGG-16 backbone to improve ball-detection accuracy. Channel and spatial attention modules – including Squeeze-and-Excitation (SE), Coordinate Attention (CA), and Efficient Channel Attention (ECA) – were systematically applied at different network stages. The models were trained and evaluated on two public datasets of labeled professional match recordings. Comparative experiments demonstrated that attention-enhanced models achieved improvements in mean Average Precision (mAP) of up to 10.4% over the baseline detector. These results suggest that the proper selection and placement of attention modules can significantly enhance precision while maintaining computational efficiency. The findings highlight concrete guidelines for designing lightweight, attention-augmented detectors in football video analysis systems, thereby supporting more reliable event detection for coaching, scouting, and automated match reporting.

**Keywords**: Soccer Analytics, Object Detection in Sports, Convolutional Neural Networks (CNNs), Single Shot Detector (SSD), Attention modules (SE, CA, ECA), Small Object Detection.

**Introduction**. Accurate ball detection in football videos remains one of the most challenging tasks, due to the small size of the ball, fast motion, frequent occlusion, and visual similarities to other elements [1]. Specialized football detectors highlight the importance of treating ball detection as a distinct problem of small-object detection [2, 3]. Nonetheless, reliable ball localization is essential for football analysis tasks, such as event detection and tactical analysis. Modern object detectors perform well on large, stable objects but show significantly lower performance on small, fast-moving objects such as a soccer ball [2-4]. In practice, the accuracy of ball detection is significantly lower than for player detection. Lightweight attention modules, such as Squeeze-and-Excitation (SE), Efficient Channel Attention (ECA), and Coordinate Attention (CA), are well-known mechanisms for improving feature representation in convolutional neural networks [5-7]. In our previous work, we demonstrated that the attention modules integrated into a feature pyramid network (FPN) improve ball detection performance in football video [8]. Meanwhile, the studies in other domains indicate that the effectiveness of the attention modules depends on their placement in the network architecture [9]. Motivated by these findings, this work investigates both the type of attention mechanism and its placement in an SSD300-VGG16 detector for soccer ball detection.

**The purpose of the work** is to perform a controlled comparative analysis of lightweight attention mechanisms and their placement within an SSD300-VGG16 architecture for soccer ball detection.

**Formulation of the problem**. Current object detectors show limited performance for soccer ball detection, and the impact of different attention mechanisms and their placement within the network is not well understood.

**Solving the problem**. To address the task of soccer ball detection, we extend the SSD300-VGG16 detector with the lightweight attention blocks [10, 11]. We used three different attention mechanisms – SE, ECA, and CA [5-7]. We tested it at different locations within the model, including the backbone, transition layer, and detection heads (see Fig. 1). The proposed design enables a controlled comparison of the three attention types and their placement under identical training and evaluation conditions.

The integration of attention blocks at various stages is motivated by the hierarchical structure of the SSD architecture, where the backbone layers provide high-resolution features that contain fine spatial details, whilst deeper layers preserve more abstract semantic information.

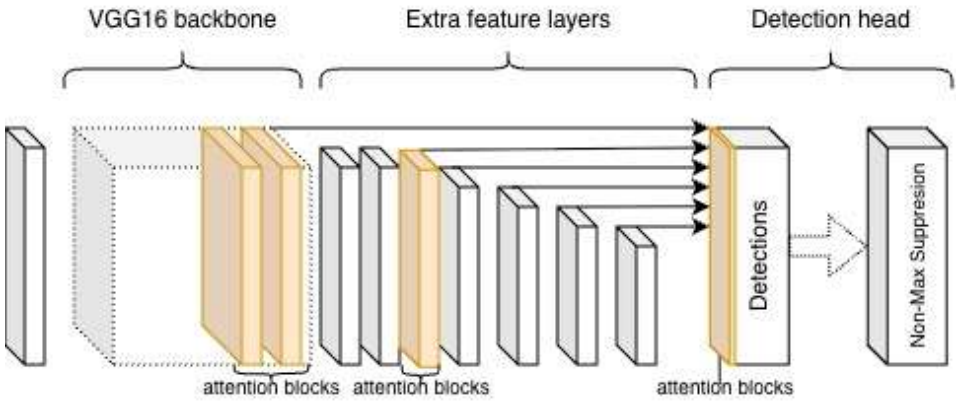



Fig. 1. Attention module placement in SSD300-VGG16

The VGG16 baseline model is initialized with pretrained weights and trained on two public datasets using data augmentation, optimization settings, and the Smooth L1 loss function (1), (2). These configurations are commonly applied in small-object detection tasks [12]. For evaluation, the VOC-style mAP and Recall at IoU=0.5 are used [13].

$$l(x, y) = L = l_1, \cdots, l_N^T, \tag{1}$$

$$l_n = f(x) = \begin{cases} 0.5 * \left(x_n - y_n\right)^2 / \beta, & |x_n - y_n| < \beta \\ |x_n - y_n| - 0.5 * \beta, & |x_n - y_n| \geq \beta \end{cases}. \tag{2}$$

The results represented in Table 1 demonstrate that all attention-enhanced models outperform the baseline detector, confirming the effectiveness of attention mechanisms for this task. The best mAP performance is achieved by the ECA module inserted into the backbone layers. At the same time, the highest Recall is obtained with the SE module at the same placement. This indicates that enhancing early and mid-level layers is most beneficial for improving detection performance, with different attention mechanisms offering a trade-off between precision and sensitivity.

Table 1

**Results of the SSD300 VGG16 model with different types and placements of attention blocks**

| Model | mAP | Recall |
|---|---|---|
| **ECA backbone** | 0.9101 | 0.9419 |
| **SE backbone** | 0.8711 | 0.9647 |
| **ECA transition** | 0.8663 | 0.9036 |
| **SE transition** | 0.8621 | 0.9405 |
| **ECA head** | 0.8616 | 0.9186 |
| **CA backbone** | 0.8605 | 0.9091 |
| **CA head** | 0.8604 | 0.9419 |
| **SE head** | 0.8503 | 0.9070 |
| **CA transition** | 0.8331 | 0.9195 |
| **Baseline model** | 0.8063 | 0.8810 |

**Conclusion**. In this work, we investigated the effects of lightweight attention mechanisms and their placement within an SSD300-VGG16 detector for soccer ball detection, focusing on three widely used modules – SE, ECA, and CA – integrated in the backbone, transition layer, and detection heads.

The experimental results confirmed that incorporating attention layers into the detection model improves detection performance. Among the evaluated models, the ECA applied to the backbone achieves the highest mAP, while the same placement of the SE attention type provides the highest Recall. These findings indicate that attention can effectively enhance small-object detection, particularly for soccer balls, while also revealing a precision-recall trade-off that depends on the attention type.

A key outcome is the importance of attention placement within the network architecture. The results demonstrate that attention applied to early and mid-level layers in the backbone, which preserve fine details, is more effective than attention to transition or detection head layers.

## References


1. Moreira, C., Ferreira, L., Coelho, P. J.: A comprehensive review of ball detection techniques in sports. PeerJ Computer Science 11, e3079 (2025). https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3079.
2. Zhou, J., Liu, H., Zhao, G., Gao, Y.: Football-YOLO: A Lightweight and Symmetry-Aware Football Detection Model with an Enlarged Receptive Field. Symmetry 17(12), 2046 (2025). https://doi.org/10.3390/sym17122046.
3. Wang, B.: Football sports video tracking and detection technology based on YOLOv5 and DeepSORT. Discover Applied Sciences 7, 563 (2025). https://doi.org/10.1007/s42452-025-07116-9.
4. Begmatov, S., Arabboev, M., Rikhsivoev, M., Saydiakbarov, S., Khamidjonov, Z., Vakhkhobov, S., Aliyarov, K., Karimov, O.: Ball and Player Detection in Futsal Videos Using YOLOv8 Model. In: Proceedings of the 29th International Conference Information Society and University Studies (IVUS 2024), CEUR Workshop Proceedings, vol. 3885, pp. 259–269 (2024).
5. Liu, P., Wang, Q.: SCA-YOLOv4: you only look once with squeeze-and-excitation, coordinate attention and adaptively spatial feature fusion. Signal, Image and Video Processing 18, 7093–7106 (2024). https://doi.org/10.1007/s11760-024-03378-9.
6. Guo, Z., Ma, D., Luo, X.: A lightweight semantic segmentation algorithm integrating CA and ECA-Net modules. Optoelectronics Letters 20, 568–576 (2024). https://doi.org/10.1007/s11801-024-3241-z.
7. Wu, Q., Wu, Y., Li, Y., Huang, W.: Improved YOLOv5s With Coordinate Attention for Small and Dense Object Detection From Optical Remote Sensing Images. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 17, 2543–2556 (2024). https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3341628.
8. Ivasenko, I. B., Bishyr, S. S.: Enhancing ball detection in football videos using attention mechanisms in FPN-based CNNs. Problems in Programming (2), pp. 54–62 (2025). https://doi.org/10.15407/pp2025.02.054.
9. Oh, M., Oh, S., Im, J., Kim, M., Kim, J. S., Park, J. Y., Yi, N. R., Bae, S. H.: Comparative Analysis of Attention Mechanisms in Densely Connected Network for Network Traffic Prediction. Signals 6(2), 29 (2025). https://doi.org/10.3390/signals6020029.
10. Yan, C., Zhang, H., Li, X., et al.: R-SSD: refined single shot multibox detector for pedestrian detection. Applied Intelligence 52, 10430–10447 (2022). https://doi.org/10.1007/s10489-021-02798-1.
11. Li, D. R.: The Application of Object Detection in Sports. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Data Science and Engineering (ICDSE 2025), pp. 72–76. SCITEPRESS (2025). https://doi.org/10.5220/0013678300004670.
12. Aldubaikhi, A., Patel, S.: Advancements in Small-Object Detection (2023–2025): Approaches, Datasets, Benchmarks, Applications, and Practical Guidance. Applied Sciences 15(22), 11882 (2025). https://doi.org/10.3390/app152211882.
13. Nikouei, M., Baroutian, B., Nabavi, S., Taraghi, F., Aghaei, A., Sajedi, A., Ebrahimi Moghaddam, M.: Small object detection: A comprehensive survey on challenges, techniques and real-world applications. Intelligent Systems with Applications 27, 200561 (2025). https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200561.

# INTEGRATION OF MULTIMODAL AI AGENTS INTO STEM TEACHING

**Bodnenko D.[1], Hlushak O.[1], Lokaziuk O.[1], Osadchyi V.[1], Osadcha V.[2]**
[1]Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
[2]Kielce University of Technology, Kielce, Poland

**Abstract**. This study is devoted to the development and theoretical substantiation of a pedagogical model for integrating multimodal AI agents into STEM discipline teaching at higher education institutions. A comprehensive comparative analysis of leading intelligent platforms (2025–2026) was carried out, which identified the Kimi system (Moonshot AI) as the optimal technological solution for the educational sector due to its ability to process extremely large context windows, an efficient Mixture-of-Experts (MoE) architecture, and high performance in solving STEM-oriented tasks.

**Keywords**: multimodal AI-agents, STEM education, STEM-based learning, AI-integrated pedagogy, Kimi AI, higher education, intelligent tutoring systems, adaptive learning environments.

**Introduction**. Contemporary higher-education institutions face a growing demand for digital transformation driven by the rapid evolution of generative and multimodal AI technologies. While numerous AI platforms (e.g., ChatGPT, Gemini, Claude, Perplexity, Kimi) demonstrate strong capabilities in reasoning, coding, and multimodal processing, it remains unclear which system offers the optimal balance of long-context reasoning, multimodal support, STEM-oriented performance, and economic accessibility for mass deployment in STEM-based curricula.

Furthermore, existing research on AI-based tutoring in STEM education focuses primarily on adaptive systems and personalized feedback, but pays insufficient attention to the institutional-level integration of multimodal agents into pedagogical workflows for teachers, researchers, and administrators. Thus, the problem addressed in this paper can be formulated as follows: how to design and validate a pedagogical model for integrating multimodal AI-agents into STEM teaching that is both theoretically grounded and empirically tested in a real-world university setting [1].

**The purpose of the work**. The purpose of this work is to develop and theoretically validate a pedagogical-technological model for integrating multimodal AI-agents into the teaching of STEM disciplines, with special attention to STEM-oriented learning in higher education. The study aims to identify the most suitable AI platform for large-scale educational deployment, to classify AI-based tools by stakeholder roles, and to assess the impact of such integration on students' learning outcomes and interaction patterns [2, 3].

**Solving the problem.** To address this problem, the study adopts a mixed-methods design that combines a comparative analysis of platform capabilities with empirical testing of an AI-agent-based intervention in STEM teaching. First, five leading multimodal AI systems (Kimi, ChatGPT, Gemini, Claude, Perplexity) are evaluated along multiple dimensions: model type (dense vs MoE), supported modalities (text, image, video, audio, code), context length, document and code processing, STEM/code performance, reasoning depth, and economic accessibility (free vs paid tiers).

Second, on the basis of this analysis, a pedagogical-technological model of multimodal AI-agent integration (Fig. 1) is constructed and operationalized in the context of STEM courses at Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University. The model is tested through a quasi-experimental design comparing pre-test and post-test results, interaction logs, and reflective feedback from students and teachers. The resulting quantitative and qualitative data are then used to refine the model and derive practical recommendations for wider implementation in higher-education settings.

The research focuses on the following tasks: Comparative analysis of multimodal AI platforms and justification of choosing Kimi for pedagogical systems; Development of a classification of AI-tools for stakeholders in education; Construction of a pedagogical model for integrating multimodal AI-agents into STEM-oriented instruction; Empirical testing of the Kimi-based multimodal platform within the actual teaching process.

Choosing an appropriate foundational artificial-intelligence platform is critically important for the effective integration of AI into higher education. Among the most prominent systems in

2025–2026 – Kimi (Moonshot AI), ChatGPT (OpenAI), Gemini (Google), Claude (Anthropic), and Perplexity AI – only a subset demonstrates an optimal balance between long-context reasoning, multimodal support, STEM-oriented capabilities, and economic accessibility.

Kimi, in particular, combines a very long context window (≈256,000 tokens), a Mixture-of-Experts (MoE) architecture, multimodal input processing, and strong performance in coding and STEM-oriented tasks, which positions it as a promising candidate for pedagogical integration in STEM-based learning environments. This article presents a comparative analysis of these platforms, proposes a classification of AI-based tools within the educational ecosystem, and introduces a pedagogical-technological model for integrating multimodal AI-agents into STEM teaching in higher education.

We selected five of the most widely used multimodal AI systems in 2025–2026: Kimi (Moonshot AI), ChatGPT (OpenAI), Gemini (Google), Claude (Anthropic), and Perplexity AI. For each platform, the following characteristics were analyzed: model type (dense vs MoE), supported modalities (text, images, video, audio, code), maximum context length, document and code processing capabilities, STEM coding performance, agent-based reasoning, and economic accessibility (free vs paid tiers). Evaluation relied on official technical documentation and API specifications, comparative studies on coding and multimodal reasoning tasks, and recent reviews of AI-agents in education and multimodal learning [2-5].

Based on this evaluation, Table 1 summarizes the functional capabilities of the selected multimodal AI systems.

Table 1

**Comparison of the functionalities of multimodal AI systems**

| Criterion | Kimi | ChatGPT | Gemini | Claude | Perplexity |
|---|---|---|---|---|---|
| **Typical model** | MoE (efficient routing of experts) | Dense + RLHF | Multimode transformer | Dense (optimized for reasoning) | Meta-agent (model aggregation) |
| **Multimodality** | text + image + video (partial) | text + image + audio | full (text, image, video, audio) | limited (mostly text) | depends on the models |
| **Context window** | up to 256K tokens | ~128 thousand | up to 1M tokens | ~200 thousand | variable |
| **Working with long documents** | very effective | average | excellent | excellent | good |
| **Coding / STEM tasks** | very strong | strong | strong | very strong | average |
| **Integration with ecosystems** | API, open-weight approach | plugins, ecosystem | Google Workspace | limited | web search |
| **Agency (multi-step)** | high | average | average | high | high |
| **Cost (free tier)** | significant free limit | limited | available (Flash) | limited | partially free |
| **Working with Big Data (PDF, code)** | one of the best | average | excellent | excellent | good |

The analysis shows that Gemini demonstrates superior multimodality and very large context scale (up to 1 million tokens), Claude excels in complex reasoning and long-text analysis, ChatGPT offers the most universal ecosystem, Perplexity specializes in search-oriented use cases, and Kimi stands out due to its combination of long context, high-efficiency MoE architecture, strong STEM and coding capabilities, and high openness with low cost.

Building on this comparative analysis, Table 2 presents a classification of Kimi-based tools within the educational system, mapping their functions to students, teachers, researchers, and administrators.

Table 2

**Classification of Kimi tools in the pedagogical system**

| Function | Teacher | Teacher | Researcher | Administrator |
|---|---|---|---|---|
| **Content generation** | automatic problem solving | creating lectures | hypothesis generation | formation of training programs |
| **Data analysis** | error analysis | evaluation of work | processing experiments | educational process analytics |
| **Multimodal interpretation** | understanding graphs | explanation of the schemes | model analysis | KPI visualization |
| **Coding** | programming training | creating simulations | scientific calculations | process automation |
| **Agent scenarios** | personal tutor | teaching assistant | research agents | educational flow management |

This classification allows stakeholders to systematically position AI-agents within their respective roles, thereby supporting the design of integrated AI-enhanced workflows in STEM teaching.

Quantitative analysis of pre-test and post-test results demonstrated a positive dynamic in students' learning achievements, particularly in conceptual understanding and the solution of applied STEM tasks. At the same time, the study identified risks associated with "illusory understanding" and excessive dependence on AI hints, underscoring the need for the teacher to act as a verifier of AI-generated content and a facilitator of reflective learning.

To formalize these relationships, Fig. 1 presents the Pedagogical-Technological Model of Multimodal AI-Agent Integration in STEM Education, which synthesizes the roles of different actors, AI-agent functions, and learning outcomes.

The empirical testing of the Kimi-based multimodal AI-agent in STEM teaching was conducted within programs in Mathematics and Computer Science at Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University. The study employed a mixed-methods approach, combining quantitative test results with qualitative data from interaction logs and participant reflections.

The results of the model testing at Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University confirmed the positive dynamics of academic achievements of students majoring in Mathematics and Computer Science. The testing results indicate a qualitative change in user interaction with the system: from receiving ready-made answers to conducting complex multi-step dialogues, which contribute to the formation of autonomous learning strategies and the development of metacognitive skills. At the same time, the need to take into account risks was identified, in particular, the threat of "illusory understanding" and excessive dependence on AI prompts, which leads to an increase in the role of the teacher as a content verifier and facilitator of the educational process.

**Conclusion.** This study demonstrates that the integration of multimodal AI-agents into STEM teaching represents a pivotal driver of digital transformation in higher education. By combining a comparative analysis of leading AI platforms with empirical testing in a university setting, the research validates Kimi as a particularly promising technology for constructing intelligent, adaptive educational systems. Its Mixture-of-Experts architecture, long context window (up to 256,000 tokens), and high performance on STEM tasks provide the necessary depth of cognitive support while maintaining economic accessibility – a critical factor for democratizing access to high-quality educational resources.

The proposed pedagogical-technological model offers a structured framework for embedding multimodal AI-agents into the teaching of STEM disciplines, clarifying the roles of students, teachers, researchers, and administrators. Future work should extend this model to other disciplines and contexts, explore longitudinal effects on learning trajectories, and develop institutional policies that mitigate risks such as misplaced trust in AI outputs and over-reliance on automated assistance.

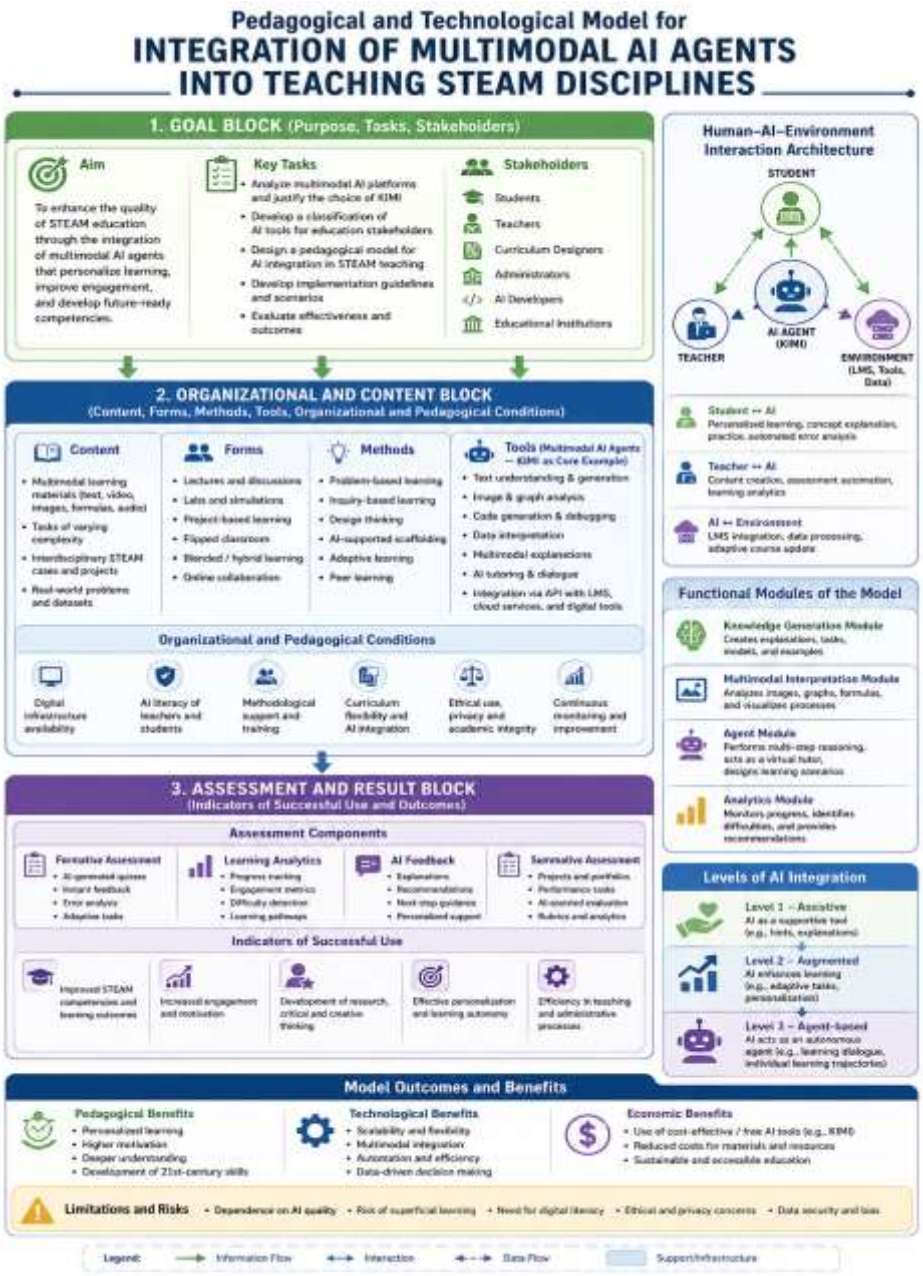



Fig. 1. Pedagogical-Technological Model of Multimodal AI-Agent Integration in STEM Education

## References


1. Villegas-Ch., W., Buenaño-Fernández, D., Navarro, A., & Mera-Navarrete, A. (2025). Adaptive intelligent tutoring systems for STEM education: analysis of the learning impact and effectiveness of personalized feedback. Smart Learning Environments, 12. https://doi.org/10.1186/s40561-025-00389-y.
2. Fathi, T., Saad, A., Larhzil, H., Lamri, D., & Ibrahmi, E. (2025). Integrating generative AI into STEM education: enhancing conceptual understanding, addressing misconceptions, and assessing student acceptance. Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research, 7. https://doi.org/10.1186/s43031-025-00125-z.
3. Lin, C., Lee, H., Wang, W., Huang, Y., & Wu, T. (2024). Enhancing reflective thinking in STEM education through experiential learning: The role of generative AI as a learning aid. Education and Information Technologies, 30, 6315 - 6337. https://doi.org/10.1007/s10639-024-13072-5.
4. Xu, W., & Fan, O. (2022). The application of AI technologies in STEM education: a systematic review from 2011 to 2021. International Journal of STEM Education, 9, 1-20. https://doi.org/10.1186/s40594-022-00377-5.
5. Memari, M., & Ruggles, K. (2025). Artificial Intelligence in Elementary STEM Education: A Systematic Review of Current Applications and Future Challenges. ArXiv, abs/2511.00105. https://doi.org/10.48550/arxiv.2511.00105.

# FLOW-MATCHING AUGMENTATION FOR RARE-CLASS ECG DIAGNOSIS ON PTB-XL

**Bondar V.[1], Babenko V.[1], Lavdanskyi A.[1], Korobeinyk Y.[1], Semenov S.[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]University of the National Education Commission, Poland

**Abstract**. Multi-label classification of 12-lead electrocardiograms is hindered by severe class imbalance: in PTB-XL the dominant class appears in 76.98 % of training samples while clinically critical conditions appear in fewer than 0.1 %. We propose a label-row sampling scheme that draws real PTB-XL multi-hot vectors with probability inversely proportional to the frequency of their rarest active code, preserving clinical co-occurrence patterns. Using this scheme with our flow-matching generator FlowECG, 20 000 synthetic recordings were added to the 17 441 real PTB-XL training records. Across three reference architectures and the six standard PTB-XL tasks, the augmented training set raised the ensemble macro-AUC from 0.9387 to 0.9502 on the diagnostic task and from 0.9317 to 0.9422 on the all-codes task.

**Keywords**: Electrocardiogram, Flow Matching, Synthetic Data, Data Augmentation, Class Imbalance, PTB-XL, Multi-Label Classification.

**Introduction**. Deep neural networks for 12-lead ECG match expert readers on common findings [1, 2, 3], but the PTB-XL benchmark [4, 5] is severely imbalanced – sinus rhythm appears in 76.98 % of training samples and several injury patterns in fewer than fifteen recordings – and rare-class accuracy suffers accordingly [6]. Synthetic-data augmentation has addressed this gap in medical imaging [7] and for ECG with diffusion-based generators [8, 9]. Our prior FlowECG generator [10] is a flow-matching model [11, 12, 13] conditioned on the 71 Standard Communication Protocol for Computer-Assisted Electrocardiography (SCP) codes of PTB-XL, with generation framed as velocity-field regression over multi-channel one-dimensional signals [14]. This work tests whether such synthetic data, sampled with a rare-class bias, improves a multi-label classifier.

**The purpose of the work** is to evaluate whether synthetic 12-lead ECG signals produced by a flow-matching generator are useful as additional training material for multi-label classification on PTB-XL, and to design a label-sampling scheme that targets the rare-class deficit of the dataset directly.

**Formulation of the problem**. A multi-label classifier trained on an imbalanced dataset systematically underperforms on rare classes: in the PTB-XL training set the dominant class (sinus rhythm) appears in 76.98 % of records, while individual clinically significant pathological codes are present in fewer than fifteen recordings. Under these conditions, standard empirical risk minimization converges primarily on majority classes, while minority classes receive insufficient training signal. Synthetic data that directly targets the rare-class deficit is one means of correcting this imbalance without requiring additional clinical annotation.

**Materials and methods**. The method consists of two components: a synthetic ECG generator and a label-sampling scheme that systematically increases the representation of rare classes in the synthetic pool.

*Generator.* FlowECG [10] is a flow-matching model with a structured state-space backbone [15] trained on PTB-XL training folds 1-8. It outputs 12-lead 10-second ECG at 100 Hz conditioned on a 71-class multi-hot label vector. We sample with 200 Euler steps.

*Inverse-frequency label sampling*. For each synthetic recording we sample, with replacement, a multi-hot label vector from the pool $L$ of real PTB-XL label rows. With $f_c$ the empirical class frequency in $L$ and $y_{i,c} \in \{0,1\}$ the indicator that class $c$ is active in the row $i$, the row weight is

$$w_i = \max_c \left( y_{i,c} \frac{y_{i,c}}{\max(f_c, \varepsilon)} \right), \quad (1)$$

i.e. the inverse frequency of the rarest active code in the row $i$. Drawing from real label rows preserves clinical co-occurrence patterns. The scheme raises the median share of the ten rarest classes from 0.08 % to about 2 % and suppresses sinus rhythm from 76.98 % to 60.30 %.

*Augmentation protocol.* We generated 20 000 balanced samples and added them to the 17 441 real PTB-XL training records (folds 1-8). The validation fold (fold 9 with 2 193 records) and the test fold (fold 10 with 2 198 records) remained pure original PTB-XL – no synthetic recording entered them at any stage. The synthetic recordings were distributed evenly across folds 1–8.

*Evaluation.* We trained three reference architectures included in the PTB-XL benchmark [5]: XResNet-1D-101, ResNet-1D Wang and Inception-1D, plus their soft-vote ensemble. Each network was trained for 25 epochs with a one-cycle learning-rate schedule, batch size 128 and StandardScaler normalization fitted on the training fold. The metric is macro one-vs-rest AUC on the test fold across the six standard tasks: all SCP codes (71 classes), diagnostic (23), subdiagnostic (35), superdiagnostic (5), form (19) and rhythm (12).

**Results**. Table 1 reports macro-AUC for two settings: XResNet-1D-101, one of the strongest single architectures in the PTB-XL benchmark [5], and the soft-vote ensemble of XResNet-1D-101, ResNet-1D Wang and Inception-1D. We report both because the single-model column is directly comparable to published PTB-XL baselines, while the ensemble column shows what a small committee of architectures achieves on the same data.

The augmented training set improves both columns on the all-SCP, diagnostic and subdiagnostic tasks. For XResNet-1D-101 the gain is +0.0117 on all SCP, +0.0100 on diagnostic and +0.0051 on subdiagnostic; for the ensemble the corresponding gains are +0.0105, +0.0115 and +0.0086. The diagnostic task – the one in which the rarest classes concentrate – shows the largest ensemble gain. The form task gains in both settings (+0.0089 for XResNet-1D-101, +0.0016 for the ensemble).

On the superdiagnostic and rhythm tasks the changes are small in absolute terms – within ±0.0021 in either column – and the sign differs between the two settings: XResNet-1D-101 gains +0.0021 on rhythm and dips by 0.0013 on superdiagnostic, while the ensemble shows the opposite, +0.0017 on superdiagnostic and −0.0009 on rhythm. Rhythm classification is dominated by sinus rhythm (76.98 % of the original training samples) and its macro-AUC is sensitive to the calibration of that single class; suppressing sinus rhythm in the balanced synthetic pool is a plausible mechanism for the small ensemble regression, although the opposite XResNet-1D-101 result shows that the effect is not architecture-independent. Flips of sign on tasks where the absolute change is below 0.003 are likely within the noise band that bootstrap confidence intervals would be expected to cover.

Table 1

**Macro-AUC on PTB-XL test fold 10 – XResNet-1D-101 and soft-vote ensemble of XResNet-1D-101, ResNet-1D Wang and Inception-1D**

| Task (number of classes) | XResNet-1D-101 baseline | XResNet-1D-101 augmented | Ensemble baseline | Ensemble augmented |
|---|---|---|---|---|
| All SCP (71) | 0.9251 | 0.9368 | 0.9317 | 0.9422 |
| Diagnostic (23) | 0.9351 | 0.9451 | 0.9387 | 0.9502 |
| Subdiagnostic (35) | 0.9258 | 0.9309 | 0.9308 | 0.9395 |
| Superdiagnostic (5) | 0.9319 | 0.9306 | 0.9338 | 0.9355 |
| Form (19) | 0.9008 | 0.9097 | 0.9094 | 0.9110 |
| Rhythm (12) | 0.9582 | 0.9603 | 0.9611 | 0.9602 |

**Conclusions**. Synthetic 12-lead ECG signals produced by a flow-matching generator are useful as additional training data for multi-label classifiers on PTB-XL. Augmenting the original 17 441 training records with 20 000 inverse-frequency balanced synthetic samples raised the diagnostic-task macro-AUC. The gain is observed for both XResNet-1D-101 and the ensemble, which suggests that it stems from the composition of the training data rather than from architecture-specific overfitting. Drawing conditioning labels from real PTB-XL rows with inverse-frequency weighting addresses the rare-class deficit while keeping clinical co-occurrence patterns intact. The

strategy was less effective on tasks dominated by a single common class, which gives a clear direction for task-specific sampling schemes.

## References


1. Hong, S., Zhou, Y., Shang, J., Xiao, C., & Sun, J. (2020). Opportunities and challenges of deep learning methods for electrocardiogram data: A systematic review. Computers in biology and medicine, 122, 103801.
2. Hannun, A. Y., Rajpurkar, P., Haghpanahi, M., Tison, G. H., Bourn, C., Turakhia, M. P., & Ng, A. Y. (2019). Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. Nature medicine, 25(1), 65–69.
3. Ribeiro, A. H., Ribeiro, M. H., Paixão, G. M. M., Oliveira, D. M., Gomes, P. R., Canazart, J. A., Ferreira, M. P. S., Andersson, C. R., Macfarlane, P. W., Meira, W., Jr, Schön, T. B., & Ribeiro, A. L. P. (2020). Automatic diagnosis of the 12-lead ECG using a deep neural network. Nature communications, 11(1), 1760.
4. Wagner, P., Strodthoff, N., Bousseljot, R. D., Kreiseler, D., Lunze, F. I., Samek, W., & Schaeffter, T. (2020). PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset. Scientific data, 7(1), 154.
5. Strodthoff, N., Wagner, P., Schaeffter, T., & Samek, W. (2020). Deep learning for ECG analysis: Benchmarks and insights from PTB-XL. IEEE journal of biomedical and health informatics, 25(5), 1519-1528.
6. Johnson, J. M., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). Survey on deep learning with class imbalance. Journal of big data, 6(1), 27.
7. Frid-Adar, M., Diamant, I., Klang, E., Amitai, M., Goldberger, J., & Greenspan, H. (2018). GAN-based synthetic medical image augmentation for increased CNN performance in liver lesion classification. Neurocomputing, 321, 321-331.
8. Alcaraz, J. M. L., & Strodthoff, N. (2023). Diffusion-based conditional ECG generation with structured state space models. Computers in biology and medicine, 163, 107115.
9. Neifar, N., Ben-Hamadou, A., Mdhaffar, A., & Jmaiel, M. (2024, May). Diffecg: A versatile probabilistic diffusion model for ecg signals synthesis. In 2024 IEEE/ACIS 22nd International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA) (pp. 182-188). IEEE.
10. Bondar, V., Semenov, S., Babenko, V., & Holovniak, D. (2025). Flowecg: Using flow matching to create a more efficient ecg signal generator. arXiv preprint arXiv:2509.10491.
11. Lipman, Y., Chen, R. T., Ben-Hamu, H., Nickel, M., & Le, M. (2022). Flow matching for generative modeling. arXiv preprint arXiv:2210.02747.
12. Ho, J., Jain, A., & Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. Advances in neural information processing systems, 33, 6840-6851.
13. Song, Y., Sohl-Dickstein, J.N., Kingma, D.P., Kumar, A., Ermon, S., & Poole, B. (2020). Score-Based Generative Modeling through Stochastic Differential Equations. ArXiv, abs/2011.13456.
14. Fedorov, E., Babenko, V., Honcharov, A., Chepynoha, A., & Utkina, T. (2024, May). Neural Network Models for Approximation of One-Dimensional Signals. In International Scientific-Practical Conference" Information Technology for Education, Science and Technics" (pp. 189-202). Cham: Springer Nature Switzerland.
15. Gu, A., Goel, K., & Ré, C. (2021). Efficiently modeling long sequences with structured state spaces. arXiv preprint arXiv:2111.00396.

# TEACHING IN THE DIGITAL AGE: HUMAN-AI CO-CREATION OR TEACHERS' REPLACEMENT?

**Chengcheng Li[1], Margarida Romero[1,2], Oksana Strutynska[1]**
[1]Smart EdTech & LINE, Université Côte d'Azur, Nice, France
[2]Artificial Intelligence Research Institute (IIIA-CSIC), Barcelona, Spain

**Abstract**. This study examines the evolving role of Artificial Intelligence (AI) in education, emphasizing whether it fosters human–AI co-creation or risks replacing teachers. Drawing on analysis of the recent literature and survey data from educators and Large Language Models (LLMs), the research highlights the growing significance of generative AI (GenAI) and Augmented Intelligence as catalysts for innovation in teaching and learning. The findings reveal that educators are increasingly using AI to streamline routine tasks and personalize instruction, thereby enhancing both efficiency and engagement. The #ppAI6 model outlines six levels of creative AI engagement, illustrating a continuum from passive use to active co-creation. Survey results show a divided perception: 42% of educators believe AI will not replace teachers, while 45% expect partial replacement. LLMs, however, consistently suggest that AI will augment rather than replace human educators, contributing to more collaborative and adaptive learning environments. Both educators and AI systems identify administrative work and assessment as delegable functions. Overall, the study concludes that the synergy between AI and human educators is vital for the future of education, as empathy, critical thinking, and emotional intelligence remain uniquely human strengths that AI cannot replicate.

**Keywords**: Digital Trends in Education, AI in education, Generative AI (GenAI), Large Language Model (LLM).

**Introduction**. In recent years, we have witnessed numerous changes due to the rapid development of digital technologies, particularly artificial intelligence (AI). The end of 2022 witnessed the rapid growth of generative artificial intelligence (GenAI), which altered perspectives on the demands placed on experts' roles, professional activities, and abilities, as well as the labor market as a whole. In this sense, people with AI expertise may have an advantage in an unpredictable labor market. Therefore, the use of AI in education and its effects on every step of the learning process are a crucial topic that scholars and practitioners are now researching (CIDDL, 2024; Cukurova, 2024; Urmeneta & Romero, 2024).

A large number of people, both in their professional activities and daily lives, are now widely using GenAI, particularly Large Language Models (LLMs). Their use promotes co-creation processes between humans and AI. That is why many researchers are now studying the issues related to Augmented Intelligence.

Human-AI Co-Creativity provides potential for enhancing human creative abilities beyond what is now typical for human creativity through the integration of (generative) AI tools, systems, and agents (Haase & Pokutta, 2024). According to Serbanescu & Nack (2023), contemporary AI systems are capable of more than only fostering human creativity. They actively participate in the co-creation processes between humans and AI. Exploring such opportunities is especially important for educators, as using AI as a co-creator will enable them to reduce routine tasks and allocate more time for creative teaching.

**The purpose of the work.** This study presents the results of a pilot survey on the role of AI as a teacher and its impact on modern education.

**Formulation of the problem**. In the context of human-AI interaction, there are different views on who should be credited with shared ideas, achievements, and research: humans or AI. Many educators today are wondering whether AI will soon replace human teachers, and what human-AI interaction, co-creation, and collaboration might look like, and what the future of modern education might look like in a context of ubiquitous use.

**Solving the problem**. This research presents the results of a pilot survey on AI's role as a teacher and its effects on contemporary education. The target group at present consists of **273 participants** (**87%** of whom are **educators**). In this study, we asked **educators** (**238 respondents**)

and AI systems (LLMs: ChatGPT, Mistral, Claude, Gemini, Copilot, and Perplexity) about their opinions on whether AI teachers will replace humans in the near future or if it will be a human-AI collaboration and co-creation. Some results of this research are presented below (in Fig. 1-2 and Table 1).

**Q.**: *Do you think AI systems will be able to replace teachers in the future?*

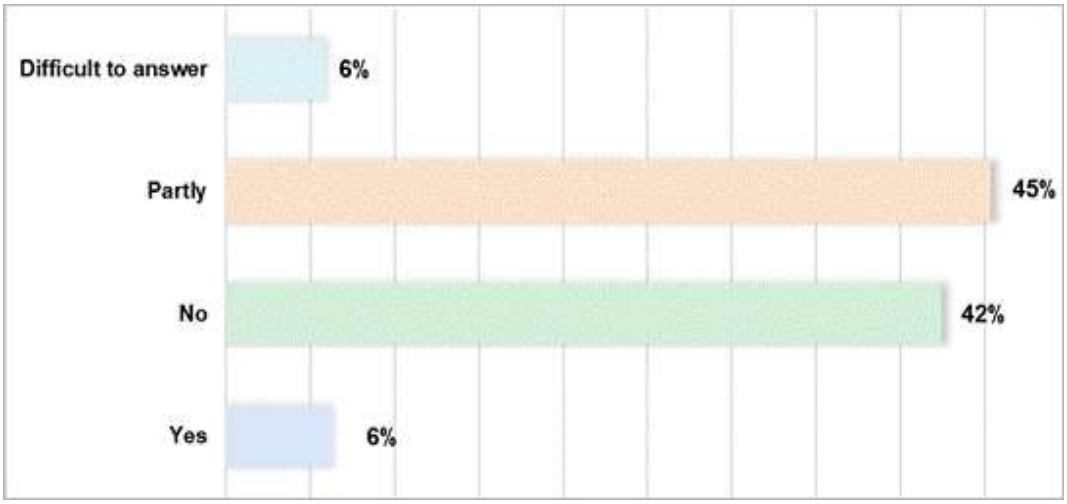



Fig. 1. Educators' opinions about whether AI teachers will replace humans in the near future

As shown in Fig. 1, there is a notable polarization among respondents' answers: almost half (42%) believe that AI will not replace teachers, while the other half (45%) believe that AI can partially replace humans.

The responses to the same question gained after working (collaboration, co-creative, prompting) with LLMs are presented in Table 1.

Table 1

**LLMs' responses to the question about replacing human teachers with AI**

| LLMs | LLMs responses |
|---|---|
| ChatGPT | **No**, AI may change how we teach, but it's unlikely to fully replace teachers |
| Mistral | **Unlikely**. AI is more likely to transform and augment its roles |
| Claude | **Unlikely** that AI systems will fully replace teachers in the foreseeable future |
| Gemini | **No**, AI systems will not completely replace teachers in the foreseeable future |
| Copilot | AI **won't completely replace teachers**. It's more about synergy between AI and teachers |
| Perplexity | **Unlikely** that AI will fully replace teachers in the future |

The analysis of LLMs' responses showed that in the near future, human teachers will not be replaced by AI.

**Q.**: *Is it possible that in the coming years **(e.g., by 2030)**, educational functions (or part of them) will be "able" to be performed by AI systems?*

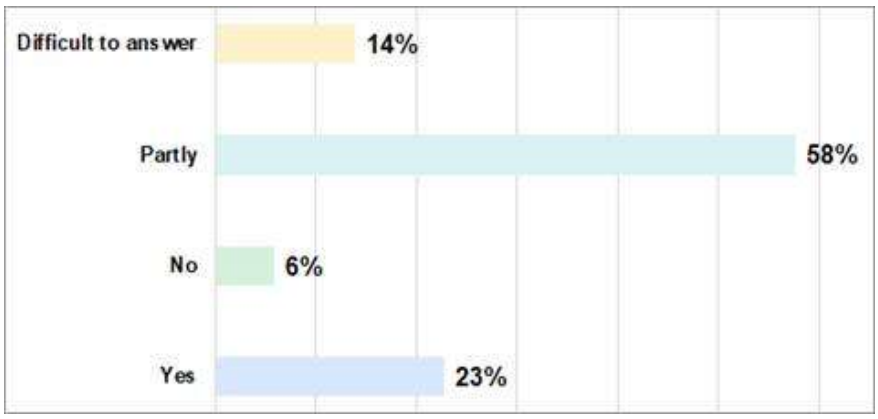



Fig. 2. Educators' opinion about whether educational functions (or part of them) will be "able" to be performed by AI systems (e.g., by 2030)

As shown in Figure 2, more than 80% of respondents (58% answered “partly” and 23% answered “yes”) believe that some educational functions can be performed by AI systems. This indicates that processes are already underway that will influence the future of education.

Responses to the same question, obtained after working (collaboration, co-creative, prompting) with LLMs, showed that in the near future, some human educational functions will be performed by AI systems, but they will not be able to completely replace teachers.

**Conclusion**. The conducted study concludes that AI and human educators working together are key to the future of education. Similar conclusions have been reached by Chan & Tsi (2023) in their research. Teachers, students, and academic institutions can successfully integrate AI by understanding and improving its distinctive features, providing a comprehensive and meaningful educational experience. These studies show that students value and respect human teachers, even as AI becomes more prevalent in education. The studies by Chan & Tsi (2024) and Nikitina & Ishchenko (2024) also suggest that, while some believed that generative AI could eventually replace teachers, most participants argued that human teachers possess unique qualities, including critical thinking and emotions, that make them indispensable.

## References

1. Center for Innovation, Design, and Digital Learning (2024). Artificial Intelligence: The Impact of AI on Education for All Learners. CIDDL. https://ciddl.org/wp-content/uploads/2025/03/Artificial-Intelligence-The-Impact-of-AI-on-Education-for-All-Learners.pdf?utm_source=chatgpt.com.
2. Chan, C. K. Y., & Tsi, L. H. Y. (2023). The AI Revolution in Education: Will AI Replace or Assist Teachers in Higher Education? (No. arXiv:2305.01185). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01185.
3. Chan, C. K. Y., & Tsi, L. H. Y. (2024). Will generative AI replace teachers in higher education? A study of teacher and student perceptions. Studies in Educational Evaluation, 83, 101395. https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2024.101395.
4. Cukurova, M. (2024). The Interplay of Learning, Analytics, and Artificial Intelligence in Education: A Vision for Hybrid Intelligence (No. arXiv:2403.16081). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.16081.
5. Haase, J., & Pokutta, S. (2024). Human-AI Co-Creativity: Exploring Synergies Across Levels of Creative Collaboration. alphaXiv. arXiv:2411.12527v2 [cs.HC] 24. https://www.alphaxiv.org/abs/2411.12527v2.
6. Nikitina, I., & Ishchenko, T. (2024). The Impact of AI on Teachers: Support or Replacement? Scientific Journal of Polonia University, 65(4), 93–99. https://doi.org/10.23856/6511.
7. Serbanescu, A., & Nack, F. (2023, October 9). Human-AI system co-creativity for building narrative worlds. IASDR 2023: Life-Changing Design, Milan, Italy. https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.293
8. Urmeneta, A., & Romero, M. (2024). Creative Applications of Artificial Intelligence in Education (p.181). Springer Nature. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-55272-4

# FORECASTING CREDIT-RELATED CLIENT INDICATORS USING LSTM NEURAL NETWORKS

**Danchuk V., Linskyi O.**
National Transport University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** Accurate forecasting of credit-related client indicators is an important task in retail lending, supporting portfolio monitoring, risk assessment, and operational decision-making. This paper presents a forecasting framework based on Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks for predicting sequential client-level financial indicators using historical portfolio data. The proposed approach models temporal dependencies in borrower behavior and generates recursive forecasts over medium-term horizons. The study uses monthly observations describing credit limits, utilized amounts, and internal client risk indicators derived from real-world retail lending data. The forecasting performance of the proposed LSTM framework is evaluated against classical baseline approaches, including autoregressive and naïve forecasting models. Experimental results demonstrate that LSTM architectures provide substantially lower forecasting error and more stable predictions under heterogeneous client behavior conditions, indicating their ability to capture nonlinear temporal patterns in financial time series. The obtained results confirm the applicability of recurrent neural architectures for forecasting tasks in retail lending and demonstrate the practical potential of LSTM-based models for sequential financial analytics and risk-oriented portfolio monitoring.

**Keywords:** LSTM neural networks; retail lending; client-level financial indicators; sequential forecasting; financial analytics.

**Introduction.** Forecasting credit-related client indicators is an important task in retail lending and financial analytics. Accurate prediction of client financial behavior supports portfolio monitoring, risk assessment, and operational decision-making. Traditional statistical forecasting approaches remain widely used in financial practice due to their interpretability and relatively simple implementation [8]. However, such methods often encounter limitations when modeling heterogeneous client populations characterized by nonlinear temporal dependencies and irregular behavioral patterns.

Deep learning approaches, particularly Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks, provide effective tools for sequential financial forecasting [6]. Originally introduced by Hochreiter and Schmidhuber [3], this architecture has been widely applied in credit risk and retail lending [1, 5]. Several reviews also discuss its effectiveness in modeling complex financial time series [2, 9]. Owing to their ability to retain information over extended temporal intervals, LSTM models can capture both short-term fluctuations and long-range dependencies in borrower behavior. This study investigates the applicability of LSTM models for forecasting credit-related client indicators using historical retail lending data and evaluates their forecasting performance relative to conventional baseline approaches.

**Problem Statement.** Financial institutions face several challenges when forecasting client-level credit-related indicators. Client behavior exhibits inherent complexity and nonlinearity, with patterns evolving over time under the influence of individual financial conditions and broader economic factors. In addition, behavioral patterns vary across client groups, ranging from newly onboarded borrowers with limited historical observations to long-term clients with more established financial activity.

This diversity introduces additional uncertainty and complicates the development of forecasting models that are both reliable and operationally meaningful. Effective forecasting approaches should therefore provide not only acceptable statistical accuracy, but also stable predictions under heterogeneous behavioral conditions commonly observed in real-world retail lending data.

**Proposed Approach.** To address the described forecasting challenges, this study develops a predictive framework based on Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks. The proposed approach uses historical sequences of client-level financial data to model temporal behavioral patterns and generate forecasts of credit-related indicators over medium-term horizons.

The methodological workflow includes several main stages. First, historical client data are aggregated, cleaned, and normalized to ensure consistent sequential inputs for the forecasting model. The input variables include credit limits, utilized amounts, and internal client risk indicators represented as monthly observations. Next, the LSTM model is trained on sequential financial data to learn temporal dependencies and generate recursive forecasts for future observation periods. The model is trained using the Adam optimizer, which is known for its efficiency in training deep learning models [4]. To prevent the issue of exploding gradients, gradient clipping was applied [7]. Forecasting performance is evaluated relative to conventional baseline approaches, including autoregressive and naïve forecasting models. Model accuracy and stability are assessed using normalized error metrics and comparative analysis of forecasting results. The proposed framework is designed to accommodate heterogeneous borrower behavior and varying temporal patterns commonly observed in retail lending data. Experimental results indicate that LSTM models effectively capture both long-term dependencies and short-term fluctuations, providing more stable forecasts than traditional approaches under complex behavioral conditions.

**Conclusion and Future Directions.** The obtained results demonstrate that LSTM models provide an effective approach for forecasting credit-related client indicators using sequential financial data. Compared to conventional statistical forecasting methods, the proposed framework achieves improved prediction accuracy and more stable forecasting performance under heterogeneous client behavior conditions. The experimental evaluation confirms that recurrent neural architectures are capable of capturing complex temporal patterns and nonlinear behavioral variations commonly observed in retail lending data. The proposed approach can be applied to portfolio analytics and sequential financial forecasting tasks by generating medium-term forecasts of client-level indicators based on historical observations. The obtained results also confirm the applicability of deep learning methods for sequential forecasting tasks involving irregular and dynamically changing financial behavior.

Several directions for further research may be considered. Incorporating additional client-related information, including transaction activity, demographic attributes, and macroeconomic variables, may improve forecasting quality and model robustness. Future studies may also investigate more advanced recurrent and attention-based architectures, as well as longer forecasting horizons and adaptive retraining strategies for continuously updated financial data.

## References


1. Ala'raj, M., Abbod, M.F. & Majdalawieh, M. (2021) Modelling customers credit card behaviour using bidirectional LSTM neural networks. J Big Data 8, 69. https://doi.org/10.1186/s40537-021-00461-7
2. Fjellström C. (2022) Long Short-Term Memory Neural Network for Financial Time Series, IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Osaka, Japan, 2022, pp. 3496-3504. https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10020784
3. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. Neural Computation, 9(8), 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735
4. Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. International Conference on Learning Representations (ICLR). https://arxiv.org/abs/1412.6980
5. Li, J., Xu, C., Feng, B., & Zhao, H. (2023). Credit Risk Prediction Model for Listed Companies Based on CNN-LSTM and Attention Mechanism. Electronics, 12(7), 1643. https://doi.org/10.3390/electronics12071643
6. Mienye, I. D., Esenogho, E., & Modisane, C. (2026). Deep Learning for Credit Risk Prediction: A Survey of Methods, Applications, and Challenges. Information, 17(4), 395. https://doi.org/10.3390/info17040395
7. Pascanu, R., Mikolov, T., & Bengio, Y. (2013). On the difficulty of training recurrent neural networks. International Conference on Machine Learning (ICML), 1310–1318. https://arxiv.org/abs/1211.5063
8. Zhang, X., Yu, L., (2024) Consumer credit risk assessment: A review from the state-of-the-art classification algorithms, data traits, and learning methods, Expert Systems with Applications, Volume 237, Part A, 121484. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121484
9. Zhang, L. (2022) The Evaluation on the Credit Risk of Enterprises with the CNN-LSTM-ATT Model, Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 6826573, 10 pages. https://doi.org/10.1155/2022/6826573

# ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR FAKE NEWS DETECTION: BENCHMARKING MULTIMODAL VISION-LANGUAGE MODELS IN SOCIAL MEDIA

**Derbentsev V.[1], Bezkorovainyi V.[1], Matviychuk A.[1],**
**Hostryk A.[2], Danylchuk H.[3]**
[1]Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine
[2]Odesa National Economic University, Odesa, Ukraine
[3]Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This paper benchmarks open-source multimodal large language models (MLLMs) for fake news detection in social media. The study focuses on misinformation detection in multimodal content that combines textual and visual information. Four vision-language models, including LLaVA-1.5-7B, Qwen2.5-VL-7B, PaliGemma-2-9B, and EuroVLM-9B, are evaluated on two datasets: Fakeddit (English, multimodal) and RU22Fact (multilingual, text-based). Three experimental settings are considered: zero-shot classification, few-shot learning, and parameter-efficient fine-tuning using Low-Rank Adaptation (LoRA) and quantized LoRA (QLoRA). Experimental results show that fine-tuned models achieve 77-79% F1-score on the six-class Fakeddit benchmark, improving performance by approximately 24-27% compared with zero-shot inference. In multilingual fake news detection, EuroVLM-9B demonstrates the strongest cross-lingual transfer performance for Slavic languages (Russian and Ukrainian), achieving 61.2% F1-score on Russian in zero-shot evaluation and 74.3% on Ukrainian after fine-tuning. In addition, QLoRA preserves competitive predictive performance with only minor quality degradation (1-2%) while reducing memory consumption by approximately 40%, making model adaptation more feasible on resource-constrained hardware.

**Keywords:** artificial intelligence, fake news detection, multimodal learning, vision-language models, LoRA, parameter-efficient fine-tuning, social media security.

**Introduction.** Fake news dissemination in social media remains a major challenge for digital communication ecosystems, affecting public opinion, political processes, and societal trust. Recent progress in artificial intelligence (AI), particularly in large language models (LLMs) and vision-language models (VLMs), has enabled new approaches to automated misinformation detection based on multimodal data embeddings [1]. Traditional fake news detection methods mainly focus on textual analysis and often do not account for the multimodal structure of modern online content, where textual and visual information are closely interconnected [2]. Recent studies show that combining visual and textual features improves fake news classification performance [3], while LLMs also demonstrate potential for multilingual and cross-lingual fake content detection [4]. At the same time, proprietary multimodal models such as GPT-4V have limited applicability in academic and practical settings due to restricted access, limited reproducibility, and substantial computational costs. These limitations increase interest in open-source multimodal LLMs, which provide greater flexibility for model adaptation, experimental transparency, and cost-efficient deployment in misinformation detection tasks.

**Formulation of the problem**. Existing AI-based fake news detection approaches have several limitations. First, many studies focus primarily on English-language content and therefore provide limited support for multilingual disinformation analysis. Second, conventional text-based methods often fail to identify cross-modal inconsistencies in cases where visual content contradicts textual information. Third, many large multimodal models require substantial computational resources, which restricts their practical use in research and real-world deployment. In addition, systematic benchmark comparisons of open-source multimodal LLMs for fake news detection and information security tasks remain limited.

**The purpose of the work**. The objective of this study is to benchmark open-source multimodal LLMs for fake news detection in monolingual and multilingual settings. The study also evaluates parameter-efficient fine-tuning methods (LoRA and QLoRA), analyzes cross-lingual transfer performance for Slavic languages, and examines the feasibility of resource-efficient model adaptation.

**Solving the problem.** We selected four representative open-source multimodal LLMs based on architectural diversity and multilingual capabilities: LLaVA-1.5-7B (baseline vision-language model), Qwen2.5-VL-7B (multilingual model supporting 100+ languages including Slavic), PaliGemma-2-9B (optimized for parameter-efficient fine-tuning), and EuroVLM-9B (specialized for 35 European languages with enhanced support for Slavic language family). All models are compatible with NVIDIA A100 40GB GPU for accessible research and deployment.

The experimental design includes two complementary datasets representing different aspects of misinformation: (1) Fakeddit – a large-scale multimodal benchmark with over 1 million text-image pairs from Reddit, annotated with 6-way fine-grained labels (true news, satire/parody, misleading content, imposter content, false connection, manipulated content), enabling evaluation of cross-modal reasoning [2]; (2) RU22Fact – a multilingual fact-checking dataset containing 16,033 samples in four languages (English, Russian, Ukrainian, Chinese) focused on the Russia-Ukraine conflict, with 3-way classification (supported, refuted, not enough information), designed to assess cross-lingual AI capabilities [5].

For parameter-efficient fine-tuning, we employed Low-Rank Adaptation (LoRA) [6], which freezes the pre-trained model weights and injects trainable low-rank decomposition matrices into each layer of the transformer architecture. The LoRA configuration utilized rank values $r \in \{16, 32\}$ to balance parameter efficiency and model expressiveness.

The scaling parameter $\alpha$ was set to $2r$ ($\alpha=32$ for $r=16$, $\alpha=64$ for $r=32$) following best practices for maintaining training stability. Target modules included all attention projection layers: query (q_proj), key (k_proj), value (v_proj), and output (o_proj) matrices, as well as feed-forward network components (gate_proj, up_proj, down_proj) for comprehensive adaptation. Dropout rate was configured at 0.05 to prevent overfitting while maintaining generalization capability.

Quantized LoRA (QLoRA) extended this approach by quantizing the base model to 4-bit precision using NormalFloat4 (NF4). The configuration employed double quantization and bfloat16 computation for stable training with quantized weights. This reduced memory requirement from 14-20GB to 5-10GB per model, enabling multi-model training on a single A100 GPU.

Training hyperparameters were optimized for convergence and computational efficiency: AdamW optimizer with learning rate $2\times10^{-4}$, cosine annealing learning rate scheduler with 10% warm-up ratio, effective batch size 16 (per-device batch size 4 with gradient accumulation steps 4), and 3 training epochs. Gradient checkpointing and mixed-precision training were applied to improve memory efficiency and accelerate computation.

Three experimental scenarios were investigated to comprehensively assess model capabilities [7]: (1) Zero-shot evaluation where models classify news without any task-specific training, relying solely on pre-trained knowledge and carefully engineered prompts; (2) Few-shot in-context learning with 5-shot and 10-shot configurations, providing labeled examples directly in the prompt to guide model reasoning; (3) Supervised fine-tuning with LoRA and QLoRA as described above.

Evaluation metrics included accuracy, macro-averaged F1-score (to account for class imbalance), per-class precision and recall, inference latency (milliseconds per sample), and peak memory consumption. For multilingual experiments, we additionally measured cross-lingual transfer performance by training on English data and evaluating on Russian and Ukrainian test sets to assess the AI model's ability to generalize across linguistically diverse contexts.

**Results.** Table 1 presents the performance of the evaluated AI models across different experimental settings and datasets. Fine-tuning with LoRA improved performance across all evaluated models. On Fakeddit, Qwen2.5-VL-7B achieved the highest F1-score of 79.4%, corresponding to a 24.1 percentage point improvement compared with the zero-shot baseline. Per-class analysis showed that the *True* and *Satire* categories achieved the highest F1-scores (85-90% and 75-82%, respectively), whereas *False Connection* and *Misleading Content* remained more challenging (65-75% F1), suggesting that cross-modal inconsistency detection remains a difficult task for current multimodal models.

For multilingual evaluation on RU22Fact, EuroVLM-9B showed the strongest performance on Slavic languages, achieving 61.2% F1-score on Russian in the zero-shot setting and 74.3% on Ukrainian after fine-tuning, exceeding other evaluated models by 6-10 percentage points. These

results indicate the importance of language-specific pre-training for multilingual fake news detection.

Table 1

**AI model performance on Fakeddit and RU22Fact datasets**

| Model | Fakeddit Zero-shot Acc, % | Fakeddit LoRA F1, % | RU22 (RU) Zero-shot F1, % | RU22 (UA) Fine-tuned F1, % | Memory (GB) |
|---|---|---|---|---|---|
| LLaVA-1.5-7B | 50.2 | 76.8 | 38.5 | 60.4 | 14 |
| Qwen2.5-VL-7B | 55.3 | **79.4** | 55.2 | 70.8 | 16 |
| PaliGemma-2-9B | 52.7 | 78.1 | 51.3 | 68.5 | 18 |
| EuroVLM-9B | 52.1 | 78.6 | **61.2** | **74.3** | 20 |

Cross-lingual transfer experiments further showed that EuroVLM-9B exhibited only 6-10% performance degradation when trained on English and evaluated on Slavic languages, compared with 20–25% for LLaVA-1.5-7B, confirming the advantages of multilingual architectures in cross-lingual misinformation detection.

**Conclusion.** The benchmark results show that open-source multimodal AI models can achieve competitive performance in fake news detection when fine-tuned using parameter-efficient methods, reaching 77-79% F1-score on the evaluated tasks, although their performance remains below that of specialized architectures (92-94%). LoRA-based fine-tuning improves model performance by 24-27% compared with zero-shot baselines while requiring only 1-2% of trainable parameters. QLoRA supports memory-efficient training with only minor performance degradation (1-2%) and reduces memory requirements by approximately 40%. In multilingual experiments, EuroVLM-9B showed the strongest results for Slavic languages (61.2% F1 on Russian zero-shot, 74.3% F1 on Ukrainian after fine-tuning), indicating the value of multilingual pre-training for cross-lingual fake news detection.

Further work will focus on ensemble approaches combining multiple vision-language models, integration of external knowledge bases for fact verification, improved prompting strategies for zero-shot settings, and development of larger multilingual multimodal datasets for under-resourced languages.

## References


1. Sittar, A., Smiljanic, M., Guček, A., & Grobelnik, M. (2026). Fake news detection through LLM-driven text augmentation across media and languages. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 8(4), 103. https://doi.org/10.3390/make8040103.
2. Nakamura, K., Levy, S., & Wang, W. Y. (2020). Fakeddit: A new multimodal benchmark dataset for fine-grained fake news detection. *In Proceedings of the 12th Language Resources and Evaluation Conference* (pp. 6149-6157). European Language Resources Association. https://aclanthology.org/2020.lrec-1.755.
3. Abdullah, M., Zan, H., Javed, A., Sohail, M., Mamyrbayev, O., Turysbek, Z., Eshkiki, H., & Caraffini, F. (2026). A multimodal ensemble-based framework for detecting fake news using visual and textual features. *Mathematics*, 14(2), 360. https://doi.org/10.3390/math14020360.
4. Matviychuk, A., Derbentsev, V., Bezkorovainyi, V., Kmytiuk, T., & Hostryk, A. (2024). Leveraging artificial intelligence and large language models for fake content detection in digital media. *CEUR Workshop Proceedings*, 3933, 75-92. https://ceur-ws.org/Vol-3933/Paper_7.pdf.
5. Sun, Y., Han, Z., & Zhang, Y. (2024). RU22Fact: Optimizing evidence for multilingual explainable fact-checking on Russia-Ukraine conflict. *arXiv preprint* arXiv:2403.16662. https://arxiv.org/abs/2403.16662.
6. Hu, E. J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., & Chen, W. (2021). LoRA: Low-rank adaptation of large language models. *arXiv preprint* arXiv:2106.09685. https://arxiv.org/abs/2106.09685.
7. Hu, X., Jiang, S., Li, L., Shu, K., Liu, H., Meng, R., & Yu, P. S. (2024). Large vision-language models are also good classifiers: A study of in-context multimodal fake news detection. *arXiv preprint* arXiv:2407.12879. https://arxiv.org/abs/2407.12879.

# NEURAL NETWORK METHODS FOR DATA APPROXIMATION AND ENCODING

**Fedorov E.[1], Leshchenko M.[1], Babenko V.[1], Myroniuk T.[1], Moath Talat Salah[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 18006, Ukraine.
[2]Zarqa University, Zarqa, 132222, Jordan

**Abstract.** Currently, there is a problem with the insufficient efficiency of methods for solving approximation and data coding problems. The aim of this paper is to improve the efficiency of approximation and data coding using neural networks with associative memory. To achieve this objective, a method of neuro-associative approximation and data encoding was developed in this paper. The advantages of the proposed method include the following. The proposed generalized cerebral model of an articulation controller, which uses heterogeneous associative memory, automatically determines the number of hidden layers (one or two) and the number of neurons in the first hidden layer, and also allows the neural network to be trained in both sequential and batch modes.

**Keywords:** neural network, associative memory, data encoding, data approximation, generalized cerebral model of the articulatory controller

**Introduction.** A key challenge today is the development of methods designed to address data approximation problems encountered in general-purpose and specialised intelligent computer systems. On the other hand, data encoding is also a pressing issue, as it is essential to ensure data security [1,2].

Highly accurate methods for solving data approximation problems are computationally complicated. Methods for solving data approximation problems based on local search are highly likely to converge to a local extremum. Data approximation methods based on random search do not guarantee convergence. This raises the problem of insufficient efficiency in these methods, which warrants further investigation.

**The purpose of the work** is to improve the efficiency of data approximation and encoding using neural networks with associative memory.

**Formulation of the problem.** Among the methods used to establish associative links between objects, those based on associative neural networks [3] and those based on translational neural networks [4] play an important role.

Methods based on associative neural networks can be divided into those with associative memory, those with heteroassociative memory, and those with both associative and heteroassociative memory [5].

Existing neuro-associative methods have one or more of the following weaknesses [3]:

1. They lack associative memory.
1. They lack hetero-associative memory.
2. They do not process real-world data.
3. They do not possess high associative memory capacity.
4. They lack high accuracy.
5. They involve high computational complexity.

Existing neural-translational methods have one or more of the following drawbacks [4]:

– difficulty in determining the network structure, as there are no algorithms for calculating the number of layers and neurons in each layer for specific applications;

– a high probability that the training and adaptation method will get trapped in a local optimum;

– difficulty in forming a representative sample;

– the knowledge accumulated by the network is not comprehensible to humans (it is impossible to represent the relationship between inputs and outputs in the form of rules), as it is distributed across all elements of the neural network and represented as its weight coefficients.

This raises the challenge of developing effective neural network methods.

*Research objective:* The process of data approximation and coding.

*Research scope:* Methods of data approximation and coding based on neural networks with associative memory.

**Solving the problem.** To achieve this aim, the following tasks must be solved:

1. Develop a method for neuro-associative approximation and data encoding without hashing.
2. Develop a method for neuro-associative approximation and data encoding with hashing.
3. Conduct a numerical study of the proposed methods for approximation and data encoding.

The problem of improving the efficiency of data approximation and encoding boils down to finding a parameter vector $W$ that satisfies the adequacy criterion for the operational model of an artificial neural network based on associative memory and is represented as $F = \frac{1}{P}\sum_{\mu=1}^{P}(f(x_\mu, W) - d_\mu)^2 \to \min\limits_{W}$, in other words minimises the mean squared error (the difference between the model output and the desired output), where $P$ is the size of the test set, $x_\mu$ is the μ-th training input value, and $d_\mu$ is the μ-th training output value.

The method of neuro-associative approximation and data encoding without hashing is based on the Generalised Cerebral Model of Articulation Controller (GCMAC) without hashing, which is represented as

$$z_i = \min\left( floor\left( N^s \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right), N^s - 1 \right) + 1,\ i \in \overline{1, N^x},$$

$$\mathbf{y}(n) = M(\mathbf{z}(n)),$$

$$u = \sum_{i=1}^{N^y} w_i y_i .$$

where $N^x$ is the number of neurons in the input layer, $N^y$ is the number of neurons in the hidden layer (associative memory cells), $N^s$ is the number of states into which the input vector is quantised, $\mathbf{y}(n) = M(\mathbf{z}(n))$ is the procedure for automatically mapping the quantised input vector $\mathbf{z}(n)$ to a vector of associative memory cells $\mathbf{y}(n)$.

The method of neuro-associative approximation and data encoding with hashing is based on the Generalised Cerebral Model of Articulation Controller (GCMAC) with hashing, which is represented as

$$z_i = \min\left( floor\left( N^s \frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right), N^s - 1 \right) + 1,\ i \in \overline{1, N^x},$$

$$\mathbf{y}(n) = M(\mathbf{z}(n)),$$

$$h_{H(i)} = y_i,\ i \in \overline{1, N^y},$$

$$u = \sum_{i=1}^{N^h} w_i h_i .$$

where $N^x$ is the number of neurons in the input layer, $N^y$ is the number of neurons in the hidden layer (associative memory cells), $N^s$ is the number of states into which the input vector is quantised, $N^h$ is the number of hash memory cells, $\mathbf{y}(n) = M(\mathbf{z}(n))$ is the procedure for automatically mapping the quantised input vector $\mathbf{z}(n)$ to the vector of associative memory cells $\mathbf{y}(n)$, $H(\cdot)$ is the hash function.

A numerical study of the proposed methods was carried out in the Google Colab environment. The Python package neupy was used.

The results of a comparison between the proposed Generalised Cerebral Model of the Articulation Controller (GCMAC) without hash memory and the Generalised Cerebral Model of the Articulation Controller (GCMAC) with hash memory, based on the F-criterion of mean square error and computational complexity of operation, are presented in Table 1.

Table 1

**Comparison of the proposed GCMAC neural network**

| Mean Squared Error | | Computational complexity of the operation | |
|---|---|---|---|
| GCMAC without hashing | GCMAC with hashing | GCMAC without hashing | GCMAC with hashing |
| 0.05 | 0.02 | $N^y$ | $N^h$ |

Advantages of the proposed methods:

1. The proposed generalised cerebral models of the articulation controller (GCMAC) enable the automatic generation of associative memory vectors.

2. The proposed generalised cerebral model of the articulatory controller (GCMAC) with hashing improves training accuracy and operational speed (Table 1).

The proposed methods enable the scope of application of neural networks with associative memory to be expanded, as demonstrated by their adaptation for data approximation and encoding tasks, and contribute to improving the efficiency of general-purpose and specialised intelligent computer systems.

**Conclusion.**

1. To solve the problem of insufficient efficiency in data approximation and encoding, existing methods of statistical and machine learning were investigated. These studies have shown that, at present, neural network methods are the most effective.

2. The proposed generalised cerebral model of the articulatory controller made it possible to use this neural network for heterosynaptic memory and to effectively approximate and encode data.

A prospect for further research is to investigate the proposed methods for a wide range of artificial intelligence tasks, for example, the identification or synthesis of cryptographic encoding operations [6].

## References


1. Myroniuk, T.V., Sysoienko, S.V., Babenko, V.H.: Information Protection Based on Permutation Operations by Controlled of Information. Cherkasy State Technological University, Cherkasy (2021). ISBN 978-966-97302-2-0
2. Fedorov, E., Babenko, V., Honcharov, A., Chepynoha, A., Utkina, T.: Neural Network Models for Approximation of One-Dimensional Signals. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies 222, 189–202 (2024).
3. Martyniuk, T., Krukivskyi, B., Kupershtein, L., Lukichov, V.: Neural Network Model of Heteroassociative Memory for the Classification Task. Radioelectronic and Computer Systems 3, 108–117 (2022).
4. Hamdany, H.S., Al-Nima, R.R.O., Albak, L.H.: Translating Cuneiform Symbols Using Artificial Neural Network. TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control 19(2), 438–443 (2021). https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i2.16134
5. Li, Zh., Yamamoto, T.: Design of a Database-Driven Controller Realized via CMAC Memory. IFAC-PapersOnLine 56(2), 6259–6264 (2023). https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.771
6. Rudnytskyi, V., Babenko, V., Lada, N., Tarasenko, Y., Rudnytska, Y.: Constructing Symmetric Operations of Cryptographic Information Encoding. CEUR 3187, 182–194 (2021).

# HIGH-SPEED VIDEO ANALYSIS OF ROCK CUTTING AND DRILLING PROCESSES

**Hanzha Yu.[1], Rastsvietaiev V.[1], Shypunov S.[1], Yavorska V.[1]**
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract.** High-speed imaging plays a key role in studying transient phenomena during rock fragmentation by drilling and cutting tools, enabling capture of dynamic bit-rock interactions, chip formation, and vibration modes. This work investigates the applicability of video recording at a frame rate limited to 300 frames per second for analyzing PDC bit performance and stick-slip oscillations in laboratory drilling experiments on hard rock samples. The purpose is to develop a cost-effective vision-based method for extracting key process parameters (instantaneous ROP, cutter velocity, fracture propagation) without ultra-high-speed equipment. Methods include synchronized high-speed video acquisition, digital image processing for motion tracking, and derivation of velocity/acceleration fields. Results demonstrate that 300 fps provides sufficient temporal resolution for resolving major stick-slip cycles (period ~10–50 ms) and chip ejection events, with velocity measurement uncertainty below 8% relative to reference sensors. The approach allows reliable identification of critical transitions in cutting regimes and supports validation of numerical models.

**Keywords:** high-speed video, rock drilling, pdc bit, stick-slip, digital image processing, frame rate 300 fps, rate of penetration.

**Introduction.** Dynamic processes in rock destruction during drilling occur on millisecond and sub-millisecond timescales, making conventional video (25–60 fps) insufficient for capturing critical events such as crack initiation, chip detachment, and stick-slip transitions. High-speed imaging at ≥ 200 fps combined with adequate spatial resolution is required to provide quantitative data for physics-based modeling and real-time monitoring.

**Work goal.** To develop and validate an experimental methodology for high-speed video acquisition and analysis of drilling processes at 300 fps with 640×480 resolution, ensuring sufficient temporal and spatial detail for kinematic parameter extraction.

**Problem statement.** The main challenge lies in balancing high frame rate, short exposure time, illumination intensity, and image quality to minimize motion blur while preserving measurable features of the cutting zone under realistic loading conditions.

**Main part.** The image processing pipeline begins with background subtraction followed by contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE). Canny edge detection with adaptive thresholds is then applied to highlight boundaries. Lucas–Kanade optical flow tracks cutter displacement and chip motion, while particle image velocimetry (PIV), based on cross-correlation, computes the chip ejection velocity field.

Instantaneous cutter velocity is determined from:

$$v_c(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (1)$$

where $\Delta s$ represents sub-pixel displacement between consecutive frames obtained via phase correlation and $\Delta t = 1/f = 3.33$ ms.

Chip ejection velocity magnitude is calculated as:

$$v_{\text{chip}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (2)$$

with average values ranging from 2.5 to 8.1 m/s depending on rock type and applied WOB.

Fracture front propagation speed is monitored along dominant crack paths, yielding $v_{\text{fract}} \approx 150–620$ m/s for mode-I tensile cracks in the tested materials.

Cutter vibration amplitude is extracted from periodic displacement oscillations according to:

$$A_{\text{vib}} = \max \mid s(t) – s_{\text{smooth}}(t) \mid, \quad (3)$$

where $s_{\text{smooth}}(t)$ is the low-pass filtered trajectory with a cutoff frequency of 50 Hz. Measured amplitudes typically fall in the range 15–80 μm at dominant frequencies of 120–280 Hz (Fig. 1).

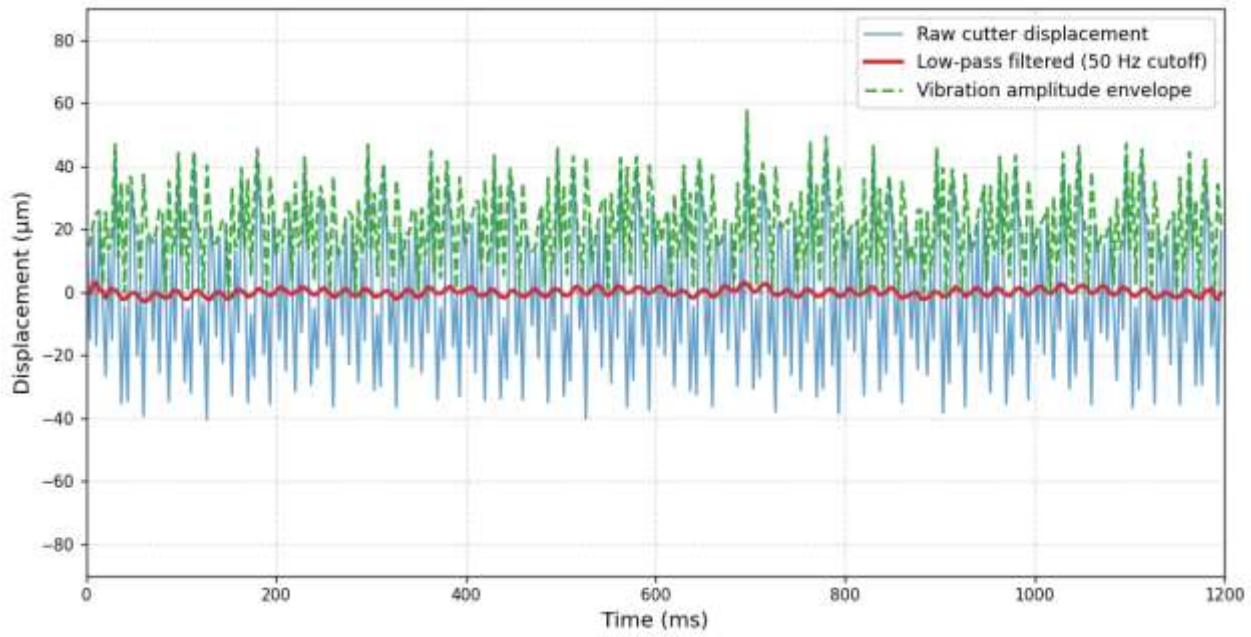



Fig. 1. Measured cutter vibration amplitude versus time showing periodic oscillations at dominant frequencies of 120–280 Hz

**Conclusions.** The developed high-speed video methodology at 300 fps with 640×480 resolution provides sufficient temporal (3.33 ms/frame) and spatial resolution to quantitatively characterize key dynamic processes during rock drilling. Extracted parameters – cutter velocity, chip ejection speed, fracture propagation rate, and vibration amplitude – enable direct validation of FEM and DEM models and support data-driven optimization of drilling regimes aimed at minimizing wear and maximizing ROP. The approach is scalable to field applications using compact high-speed cameras and edge computing for real-time feature extraction. Further work will focus on integrating multispectral illumination and machine learning for automated event classification.

## References

1. Wei, J., Liu, W., & Gao, D. (2024). Modeling of PDC bit-rock interaction behaviors based on the analysis of dynamic rock-cutting process. Geoenergy Science and Engineering, 239, 212955. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212955
2. Song, F., & Li, K. (2024). A Deep Convolutional Neural Network Approach to Automate Drilling Tool Lateral Motion Video Interpretation. In Volume 5: Dynamics, Vibration, and Control. American Society of Mechanical Engineers. ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. https://doi.org/10.1115/imece2024-145599
3. Xia, W., Li, Z., Chen, M., Zhang, Y., & Zhao, W. (2020). Study on electrode vibration in the touch-down stage of fast electrical discharge machining drilling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 109(7–8), 2273–2283. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05820-x

# DEFECT DETECTION AND CLASSIFICATION USING INBEM, YOLO 12, AND ONTOLOGY

**Havdulskyi R., Zhuravchak L.**
Lviv Polytechnic National University, S. Bandera Street 12, 79013 Lviv, Ukraine

**Abstract**. Thermography-based non-destructive testing relies on interpreting surface temperature patterns into a map of subsurface defects. However, solving the inverse problem is challenging due to ambiguous results. To address it, this paper presents a hybrid, ontology-based pipeline for defect localization and classification. We employ the Indirect Near-Boundary Element Method (INBEM) to obtain a steady-heat distribution for a 3D object. It enables the rapid generation of large-scale, YOLO-style datasets that simulate realistic top-surface temperature distributions. A YOLO 12n detector is trained to detect and classify defects. An OWL/SWRL ontology acts as a reasoning layer to resolve conflicting detections. Each overlapping detection is associated with depth estimation and visual properties: edge sharpness and contrast. This information is analyzed by the ontology, specifically expert rules, to filter out illogical results. Our findings show that this ontology-based validation has a significant impact on the performance metrics. Precision rose from 91.02% to 97.70%, and the F1-score improved to 97.70%, while recall dropped by about 1%. Further research should include depth model evaluation, fine-tuning the INBEM, recognizing multiple defects, and working on a solution to build ontology rules automatically by employing LLMs.

**Keywords**: Neural networks, inclusion recognition, non-destructive testing, SWRL reasoning, ontology.

**Introduction**. Non-destructive testing (NDT) aims to identify subsurface defects by analyzing signals captured from the surface. Thermography, as an NDT technique, focuses on measuring surface thermal signatures [1]. The inverse task (estimating defect type, location, size, and other properties) is quite ambiguous due to noise, variations in material properties, and different types of defects. The inverse problem of this kind is usually solved by employing supervised learning algorithms [2]. However, a large amount of data with significant variance is required to train a model. Thus, to solve the problem, an Indirect Near-Boundary Element Method (INBEM) in "express" implementation [3] is employed to generate a synthetic dataset with a wide variety of defect properties. A YOLO 12n [4] detector is enabled for detection and classification (two main classes are considered: holes and inclusions). To estimate depth, a custom depth head is employed [5]. As a limitation, the detector might be confused by similar signatures produced by defects of different kinds at different depth levels. Also, it might produce multiple detections for one defect. To overcome it, an OWL/SWRL ontology [6, 7] is introduced to solve conflicting detections and to support the detector in cases when it fails more frequently and consistently.

**The purpose of the work** is to develop a hybrid method for detecting and classifying subsurface defects in 3D objects using INBEM, YOLO 12n detector, and ontology-based validation of ambiguous detections.

**Formulation of the problem**. Analysis of thermographic non-destructive testing allows us to state the following: internal holes and inclusions produce surface-temperature signatures of defects of different types and depths, which may generate similar or overlapping thermal patterns that might lead to incorrect detection results.

**Solving the problem**. The solution is defined as a series of tasks: generating a dataset of thermograms using the INBEM, processing thermographic signals into RGB images, building a YOLO-style dataset, training and evaluating the YOLO 12n model, and building an ontology to validate the detector's results and resolve ambiguous detections.

The dataset of thermograms is generated for a 3D object of size 8x4x2. For INBEM hyperparameters, the near-boundary zone [8] (for the matrix) split is set to: top and bottom sides as 14x10, left and right sides as 8x14, and front and back sides as 8x10. The general size of the train dataset split is 108K elements, and the validation split consists of 25K elements. All the remaining hyperparameters, properties, and thermogram processing methods are described in our research [5].

Once the dataset is obtained, YOLO 12n is trained to solve the detection and classification problem, using RunPod [9] and an RXT 4090 Ada GPU to speed up training. Training hyperparameters are the same as for the previous step of the research. To estimate defect depth, a

depth head is employed. It analyzes a patch with a size of 224x224 around the defect detection area. ConvNeXtV2 [10] in pico and tiny versions, pretrained on ImageNet, are used as the backbone. pretrained on ImageNet. Hyperparameters (learning rate, etc.) are chosen separately for the backbone and the heads. The backbone's classification head is removed, and global average pooling produces a feature vector of 768. Since patch features alone may be insufficient, contextual features—specifically inclusion/hole size and position—are appended. SwiGLU [11] is used as the activation function. First linear layer outputs 64 features, followed by activation. And the second linear layer outputs contextual features of dimension size 256. The concatenation of both semantic and contextual information is processed by the regression head. It consists of two linear layers. They're followed by the activation function and Dropout regularization (probability is set as 0,05). Although a YOLO-based detector provides bounding boxes and class labels for thermographic defects, it might produce ambiguous outputs: two or more detections may refer to the same physical defect (duplicate boxes). To address this, we introduce an OWL/SWRL ontology that formalizes expert rules and domain constraints. The ontology takes place when a YOLO-based detector produces multiple detection that overlaps with an IOU ≥ 30 % and all of them have different classes assigned. To simplify the logic, cases of multiple detection with an IOU ≥ 30 % and the same class are handled by taking the one with the highest confidence.

The ontology diagram is shown in Fig. 1. The ontology model treats each YOLO detection as an individual instance of a defect concept, supported by both geometric and thermographic evidence.

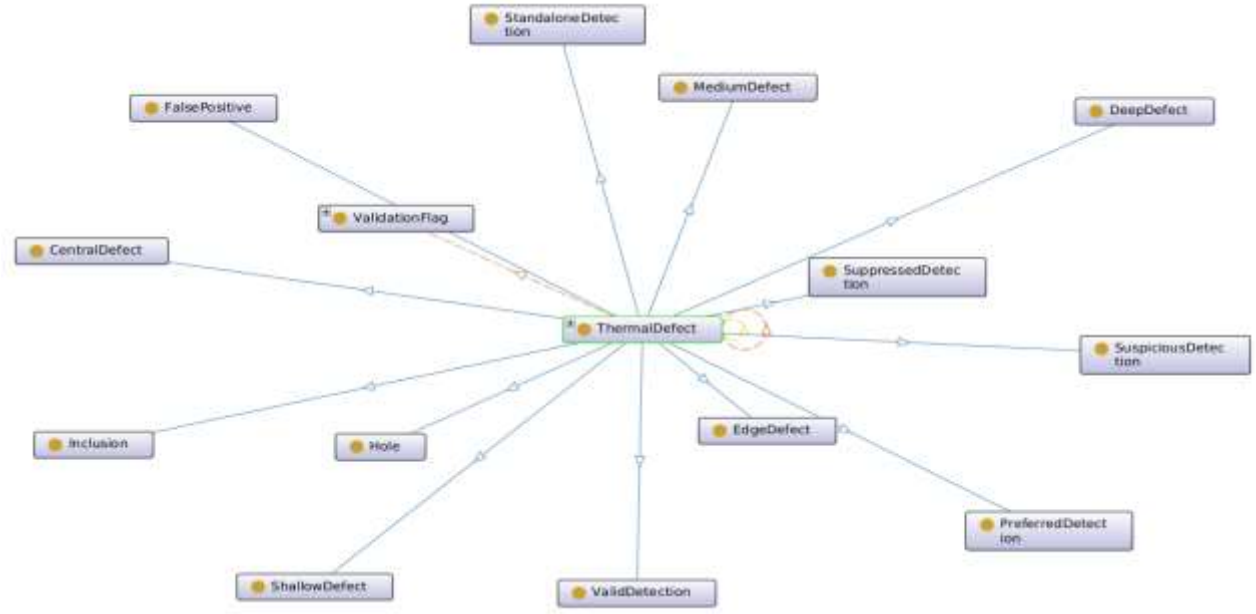



Fig. 1. The ontology diagram

To measure performance, the following metrics are enabled: mAP@50:95, mAP@50, Precision, Recall, and F1. To ensure measuring correctness, the baseline and ontology metrics were obtained using the same tools (to eliminate any differences in YOLO validation tools implementation compared to the one used).

Table 1

**Comparison of YOLO 12n without and with ontology validation**

| Metric | Baseline (YOLO 12n), % | Ontology (YOLO 12n with ontology), % | Change, % |
|---|---|---|---|
| mAP@50:95 | 80.66 | 80.67 | +0.01 |
| mAP@50 | 90.81 | 90.83 | +0.02 |
| Precision | 91.02 | 97.70 | +6.67 |
| Recall | 98.79 | 97.70 | -1.09 |
| F1 | 94.75 | 97.70 | +2.95 |

The comparison of YOLO 12n performance versus YOLO 12n supported by the ontology validator is presented in Table 1. It shows significant improvements in Precision and F1 metrics, while Recall worsened.

**Conclusion**. The results prove that INBEM, in combination with dataset preprocessing, YOLO 12n, and ontology-based reasoning, can solve the task of defect detection and classification for inclusions and holes using top-surface thermographic distributions. Thus, INBEM is considered a reasonable choice as a tool for numerical experiments. It makes it feasible to produce large datasets in a reasonable time while maintaining a wide variety of defect parameters and keeping reasonable accuracy.

The proposed ontology showed a positive impact on the final decision in ambiguous cases. In particular, it improved precision and F1 by resolving overlapping, conflicting detections. At the same time, the small recall decrease appears expected. The almost unchanged mAP@50 and mAP@50:95 values indicate that the YOLO's detections are spatially close to the ground truth. Mainly, it required additional reasoning to choose the correct class.

At the same time, there are still promising directions for future work. The evaluation in this paper does not include depth-regression metrics. Also, the current SWRL rules are domain-specific. Thus, exploring automated rule building [12] may improve the process of adapting to a new domain. An ontology might also be involved in INBEM parameter fine-tuning. And, the model must be validated on multiple defects.

## References


1. Peng, S., Addepalli, S., Farsi, M.: Machine Learning in Thermography Non-Destructive Testing: A Systematic Review. Applied Sciences. 15, 9624 (2025). https://doi.org/10.3390/app15179624.
2. Rosa, R.G., Barella, B.P., Vargas, I.G., Tarpani, J.R., Herrmann, H.-G., Fernandes, H.: Advanced Thermal Imaging Processing and Deep Learning Integration for Enhanced Defect Detection in Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates. Materials. 18, 1448 (2025). https://doi.org/10.3390/ma18071448.
3. Havdulskyi, R., Zhuravchak, L., Yakovyna, V.: Inclusion parameters estimation using INBEM and CNNs with gradient-based feature extraction. In: Hovorushchenko, T., Savenko, O., Popov, P.T., Lysenko, S. (eds.) Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPhyS 2025). CEUR Workshop Proceedings, vol. 4013, pp. 15–27. CEUR-WS.org (2025). https://ceur-ws.org/Vol-4013/paper2.pdf
4. Tian, Y., Ye, Q., Doermann, D.: YOLOv12: Attention-centric real-time object detectors. arXiv:2502.12524 (2025). https://arxiv.org/abs/2502.12524
5. Havdulskyi, R., Zhuravchak, L.: Inclusion and holes detection in 3D objects using numerical modeling and neural networks. TAPR. 1, 113–122 (2026). https://doi.org/10.15587/2706-5448.2026.352493.
6. Bahreini, F., Hammad, A.: Developing an Ontology for Concrete Surface Defects to Enhance Inspection, Diagnosis and Repair Information Modeling. Infrastructures. 9, 220 (2024). https://doi.org/10.3390/infrastructures9120220.
7. Abicht, K.: OWL reasoners still useable in 2023. arXiv:2309.06888 (2023). https://arxiv.org/abs/2309.06888
8. Zhuravchak, L.M.: Potential field modeling by combination of near-boundary and contact elements with non-classical finite differences in a heterogeneous medium. Math. Model. Comput. 11, 373–384 (2024). https://doi.org/10.23939/mmc2024.02.373.
9. Runpod: AI and cloud infrastructure provider. https://www.runpod.io/ accessed 28 April 2026.
10. Woo, S., Debnath, S., Hu, R., Chen, X., Liu, Z., Kweon, I.S., Xie, S.: ConvNeXt V2: Co-designing and scaling ConvNets with masked autoencoders. arXiv:2301.00808 (2023). https://arxiv.org/abs/2301.00808
11. Shazeer, N.: GLU variants improve transformer. arXiv:2002.05202 (2020). https://arxiv.org/abs/2002.05202
12. Andročec, D.: Using Large Language Models for Ontology Development, http://dx.doi.org/10.3390/engproc2025104009, (2025). https://doi.org/10.3390/engproc2025104009.

# PROBLEMS AND DISADVANTAGES OF USING YOLOV8 IN MODERN REAL-TIME OBJECT DETECTION SYSTEMS

**Klokta D.[1], Znakovska Y.[1,2], Averyanova Y.[1,2]**
[1]National University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine
[2] Interregional Academy of Personnel Management, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The research presents the authors' analysis of the neural network models for small Foreign Object Debris (FOD) detection, focusing on You Only Look Once (YOLOv8) and YOLOv11 models on a glass background. The results allowed us to prove initially the limitations of the architecture of previous models in real time. The process of combining data in the YOLOv8 blocks leads to image blurring and accuracy losses because of the same priority of the pixels of the object and pixels of the background. In the new YOLOv11 model, the basic blocks are replaced with blocks with a mechanism for spatial attention to decrease the priority of the background pixels and prioritizing object pixels. Practical analysis showed that the use of YOLOv11 significantly increases the accuracy of object detection: the mean Average Precision (mAP50) metric increased from 0.84 to 0.91 and Recall increased from 0.71 to 0.78. This makes the changing of model YOLOv8 to YOLOv11 a scientifically proven step for improving detection systems.

**Keywords**: Computer vision, Real-time object detection, YOLOv8, YOLOv11, Spatial attention mechanism, Convolutional neural network, small object detection, Precision, FOD.

**Introduction**. The current tasks that are connected with computer vision development and improvements are aimed at increasing the speed and accuracy of object detection in real time [1,2]. For a long time, the main standard for this purpose was the single-stage You Only Look Once (YOLO) detector version YOLOv8 [3]. This version at the time of its invention, provided relatively good results with high accuracy and completely high speed. Today, it is significantly inferior to the latest YOLO models such as YOLOv11 [4-6]. This is because of the fact that YOLOv11 has switched to a new architecture combining the improved attention mechanisms and feature extraction with an increase in computational efficiency. YOLOv8 has difficulties in detecting small details and loses efficiency when scaling [7], while YOLOv11 focuses on critically important areas that allow to increase efficiency of the detection of small object as well.

**The purpose of the work** is to identify fundamental problems and conduct a thorough analysis of these problems and disadvantages of using the YOLOv8 algorithm in modern real-time object detection systems [8] as well as to determine the limits of its effective availability**.**

**Formulation of the problem**. Analysis of the YOLOv8 model showed that as the detection complexity increases, the error and delay of image processing increase compared to modern YOLOv11 models. These conclusions are critically important for the efficiency of the algorithm. Identifying this disadvantage requires not an analysis of the basic neurons, but the analysis of the mathematical model of identifying features in key blocks of the neural network [9]. Practical confirmation of the architectural limitations of YOLOv8 is the decrease in accuracy during training on small objects (for example, nuts) from a large dataset [10]. This happens because of the merging of data from two groups of neuron blocks, the small-sized objects lose their features and become blurred. This limitation can be critical for some area of applications, for example, in aviation, during the runway operations that, in turn, influence flight safety and efficiency [11,12]. To solve this issue, the change of improving the mechanisms of generalization requires. However, it is already implemented in the next generation of neural networks YOLOv11.

**Solving the problem**. When we combine data results from different blocks of neurons in the YOLOv8 model, small objects are lost and blurred, the optimal next step would be to switch to the better and newer YOLOv11 model. Because of new implementations in the YOLOv11 model, such as new mechanisms of generalization, which is called Spatial Attention into the blocks and a new calculation mechanism, it allows detecting small objects much more accurately than the previous YOLOv8 [13].

To see the difference, let's analyze the formulas of the processing blocks in the image. In the YOLOv8 model, the data is passed through neurons and then merged together, if we describe this with a formula, it will look like this [14]:

$$Y_{v8} = (\mathbf{W} \cdot X + \mathbf{b}) \cdot \sigma(\mathbf{W} \cdot X + \mathbf{b}), \quad (1)$$

where $X$ is the input data (image),

**W** are the neuron weights,

**b** is the bias, and $\sigma$ is the activation function.

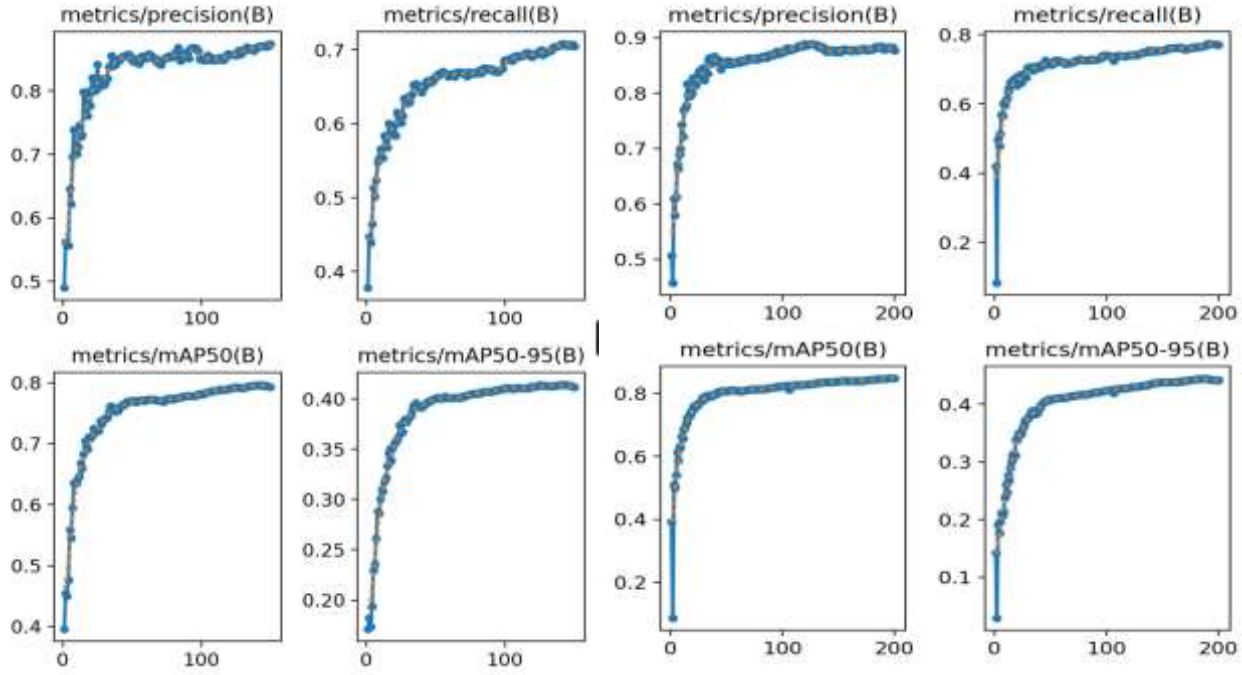
The problem with this calculation is that all pixels are merged together and have the same priority, which makes the background blur the small nut.

In YOLOv11, we solved this problem by adding a Spatial Attention mechanism. Now we can visualize this formula by the next way [13]:

$$Y_{v11} = A(X) \cdot Y_{v8},$$

where $A(X)$ is a special matrix of attention indices. This is a filter that, before merging pixels, enhances pixels where the object is located, and weakens pixels where the background is located, on the contrary. (It is important to note that in order to focus on the architecture and avoid overloading the text with unnecessary mathematical formulas, these formulas are simplified formulas compiled by the authors based on the official documentation of YOLO models [3, 13-15]).

For practical validation, comparative training of both models on a large dataset was performed. Detailed numerical results are stored in the files results.csv (for YOLOv8) and resultsyolo11.csv (for YOLOv11), and visualization of metrics is presented in Fig. 1.




a) b)

Fig. 1. Comparative characteristics of accuracy and completeness metrics of YOLOv8 (a) and YOLOv11 (b) models

Analyzing the graphs, we can conclude that the YOLOv8 model manages with small details much worse than YOLOv11. The average accuracy metric means Average Precision 50-95 (mAP50-95) reaches the plateau at 0.41, the accuracy of mean Average Precision (mAP50) is 0.84, and Recall (the indicator of found objects) does not go higher than 0.71. That is, YOLOv8 misses up to 30% of the details. In contrast to YOLOv8 metrics, the newer YOLOv11 model has a mAP50-95 metric of 0.45, mAP50 is 0.91, and the Recall indicator rises to 0.78. These results confirm the effectiveness of the new blocks with the attention matrix.

**Conclusion**. Our research confirms the fact that the YOLOv8 has important disadvantages in detecting small objects, contrary to YOLOv11. These problems lead to a loss of accuracy and blur objects in the background. Mathematical analysis of the formula and practical experiments confirmed that the standard method of the YOLOv8 combines pixels with the same priority [9] and does not allow the model to highlight small objects on a complex background, such as nuts, etc. This is confirmed by metrics (Fig 1.): the Recall, mAP50-95 and mAP50 metrics, which are significantly lower in YOLOv8 than in YOLOv11.

Using the YOLOv11 model, which uses the newest architecture of blocks with attention matrices, allows us to significantly improve the accuracy of detecting small objects by strengthening the pixels of these objects and weakening the background pixels in photographs [4]. The comparison results (Fig 1.) show us that the mAP50 metric has increased to 0.91, and the Recall indicator has increased to 0.78. Therefore, the transition to the newer YOLOv11 model is a scientifically proven and practically necessary step to improve the accuracy of detection systems in modern tasks [11] .

## References


1. Popov, O., Choch, V., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Semenets-Orlova, I., Iatsyshyn, A.: Artificial intelligence application in remote UAV methods. In Systems, Decision and Control in Energy VI, Studies in Systems, Decision and Control, vol. 561, V. Babak, A. Zaporozhets, eds. Springer Cham, (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_11
2. Meena, S., Mogili, U., Pravalika, K., Kiran, P., Naveen, N., Chetan, Y., Goudo, M.: High speed real-time object detection using YOLO-based deep learning models. International Journal of Innovative Research in Technology, 12, pp. 6541–6546, (2026). https://doi.org/10.64643/IJIRTV12I10-194746-459
3. Ultralytics.: Explore Ultralytics YOLOv8. Ultralytics Docs, (2026). https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/
4. Sapkota, R., Karkee, M.: Ultralytics YOLO evolution: An overview of YOLO26, YOLO11, YOLOv8, and YOLOv5 object detectors for computer vision and pattern recognition. arXiv preprint arXiv:2510.09653v3 [cs.CV], (2026). https://arxiv.org/abs/2510.09653
5. Wang, Z., Su, Y., Kang, F., Wang, L., Lin, Y., Wu, Q., Li, H., Cai, Z.: PC-YOLO11s: A lightweight and effective feature extraction method for small target image detection. Sensors, 25(2), 348, (2025). https://doi.org/10.3390/s25020348
6. Dudnik, A., et al.: Enhancing YOLOv11 training for explosive ordnance detection in UAV imagery. CEUR Workshop Proceedings, 4155, pp. 3–18, (2025).
7. Ultralytics.: YOLO26 vs YOLOv8: Advancements in next-generation object detection. Ultralytics Docs, (2026). https://docs.ultralytics.com/ru/compare/yolo26-vs-yolov8/
8. Prystavka, P., Dukhnovska, K., Kovtun, O., Leshchenko, O., Cholyshkina, O., Semenov, V.: Recognition of aerial photography objects based on data sets with different aggregation of classes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 121(2), (2023).
9. Ultralytics.: Loss functions source code (loss.py). GitHub Repository, (2026). https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/ultralytics/utils/loss.py
10. Klokta, D.: Dataset Bounding Box Drones (Version 3) [Data set]. Roboflow, (2026). https://app.roboflow.com/yolo-ybhhs/dataset-bounding-box-drones/5
11. Mo, Y., Wang, L., Hong, W., Chu, C., Li, P., Xia, H.: Small-Scale Foreign Object Debris Detection Using Deep Learning and Dual Light Modes. Applied Sciences, 14(5), 2162, (2024). https://doi.org/10.3390/app14052162
12. Fokkinga, E. P., van Leeuwen, M. C., Kuijf, H. J.: Air-to-ground real-time temporal small object detection from a flying platform. In Proceedings Volume 13679, Artificial Intelligence for Security and Defence Applications III, 1367907, (2025). https://doi.org/10.1117/12.3070144
13. Ultralytics.: YOLO26 vs YOLO11: A generational leap in vision AI. Ultralytics Docs, (2026). https://docs.ultralytics.com/ru/compare/yolo26-vs-yolo11/
14. Ultralytics.: Convolution modules source code (conv.py). GitHub Repository, (2026). https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/ultralytics/nn/modules/conv.py
15. Ultralytics.: Neural network blocks source code (block.py). GitHub Repository, (2026). https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/ultralytics/nn/modules/block.py

# ENHANCING PREDICTIVE MAINTENANCE IN DRILLING OPERATIONS: A HYBRID APPROACH COMBINING MACHINE LEARNING AND VIBRATION ANALYSIS

**Koroviaka Ye.[1], Ratov B.,[2] Pashchenko O.[1], Voita M.[1], Rybak A.[1]**
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[2]Satpayev University Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** Predictive maintenance (PdM) in drilling operations is essential for minimizing equipment downtime, reducing operational costs, and enhancing safety in the oil and gas industry. This study aims to improve PdM accuracy by proposing a hybrid approach that integrates machine learning (ML) algorithms with real-time vibration analysis. The primary objective is to detect early signs of equipment failure in drilling rigs, such as drill bits, pumps, and motors, where vibrations serve as a key indicator of mechanical stress and wear. The research focuses on the object of drilling machinery under dynamic loads, with the purpose of developing a proactive system that predicts failures before they occur.

Methods employed include collecting vibration data via accelerometers and sensors installed on drilling equipment, followed by feature extraction (e.g., amplitude, frequency spectra, and root mean square values). ML models, including random forests, support vector machines, and deep neural networks, are trained on historical datasets combining vibration signals with maintenance records. The hybrid model uses vibration analysis for initial anomaly detection and ML for pattern recognition and failure prediction, achieving integration through ensemble techniques.

Results demonstrate a 25-30% improvement in prediction accuracy compared to traditional vibration-based methods alone, with a reduction in false positives by 18%. The approach was validated on simulated drilling data and real-field trials, showing potential for real-time implementation in industrial settings. This hybrid method not only extends equipment lifespan but also optimizes maintenance schedules, contributing to more efficient drilling operations.

**Keywords:** Predictive Maintenance, Drilling Operations, Machine Learning, Vibration Analysis, Anomaly Detection, Oil and Gas Industry.

**Introduction.** Drilling operations in the oil and gas sector face significant challenges due to harsh environments, high mechanical loads, and the risk of unexpected equipment failures. Traditional maintenance strategies, such as reactive or scheduled approaches, often lead to unnecessary downtime or overlooked issues. Predictive maintenance (PdM) leverages data-driven techniques to anticipate failures, but single-method approaches like pure vibration monitoring may miss subtle patterns in complex systems.

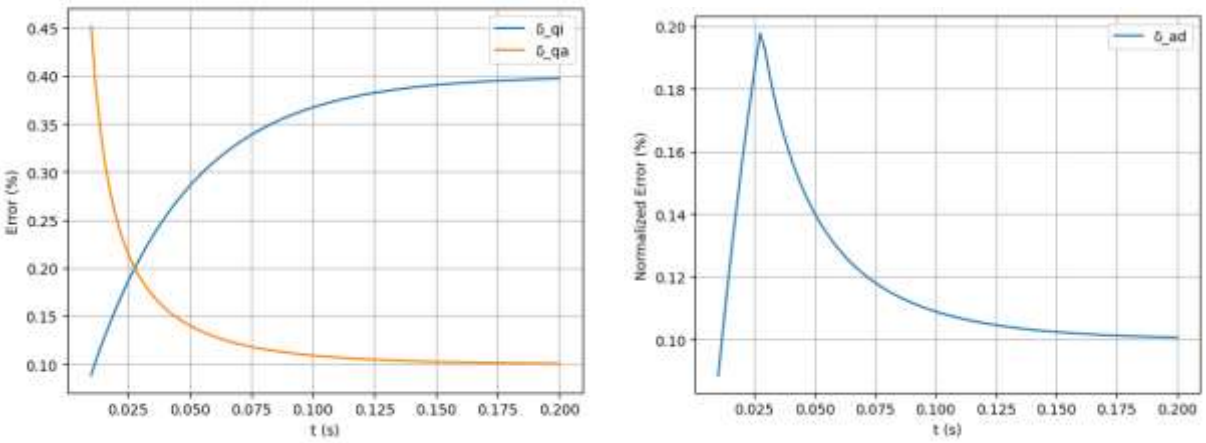
**Work goal.** The goal of this work is to develop and validate a hybrid PdM framework that combines vibration analysis with machine learning to enhance failure prediction accuracy and reliability in drilling operations.

**Problem statement.** Vibration signals provide real-time insights into equipment health but interpreting them in noisy drilling environments is challenging. Machine learning can process large datasets for pattern recognition, yet it requires robust feature inputs. The problem lies in integrating these methods to create a system that detects anomalies early, predicts failure timelines, and minimizes false alarms, all while handling variable operating conditions like depth, rock type, and rotational speeds.

**Main part.** The proposed hybrid approach begins with data acquisition using piezoelectric accelerometers mounted on critical drilling components (e.g., top drive, mud pumps). Vibration data is preprocessed to extract time-domain features (RMS, peak amplitude) and frequency-domain features (FFT spectra) using tools like Python's SciPy library.

Machine learning models are then applied: a convolutional neural network (CNN) for automatic feature learning from vibration waveforms, combined with a random forest classifier for failure type prediction (e.g., bearing wear, bit dulling). The hybrid integration uses a two-stage process–vibration thresholds trigger ML analysis for confirmation and severity assessment. Training data includes labeled datasets from historical logs, augmented with synthetic vibrations generated via simulations.

Experimental validation involved a dataset of 500 drilling hours, split 70/30 for training/testing. The model achieved 92% accuracy in failure prediction, outperforming standalone vibration analysis (78%) and basic ML (85%). Figure 1 illustrates the vibration spectrum before and after anomaly detection.




a b

Fig. 1. Vibration frequency spectrum showing normal (a) vs. anomalous (b) patterns in drilling pump operation

Equations for vibration feature extraction include RMS calculation:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2},$$

where $x_i$ are vibration samples, and $N$ is the sample count.

The ML prediction uses a softmax output for the probability of failure classes.

**Conclusions.** The hybrid approach enhances PdM in drilling by leveraging the strengths of vibration analysis for real-time monitoring and ML for advanced prediction. It reduces downtime by up to 20% and supports scalable implementation via edge computing. Future work includes field trials and integration with IoT sensors.

## References


1. Benarbia, A., Ghachi, S., Khalifa, H., & Tomomewo, O. S. (2024). AI-Driven Predictive Maintenance for Enhanced Reliability of Top Drive Thrust Bearings. In 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA. 58th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. https://doi.org/10.56952/arma-2024-0921
2. Dayam, S., & Desai, K. A. (2022). Digital Twin-Based Tool State Prognosis Model for Drilling Machines. In Volume 2: Manufacturing Processes; Manufacturing Systems. American Society of Mechanical Engineers. ASME 2022 17th International Manufacturing Science and Engineering Conference. https://doi.org/10.1115/msec2022-85449
3. Helkany, M., Mondal, P., Mahmoud, M. M., & Chakchouk, A. (2024). Innovating Extraction: AI and Machine Learning for Enhanced Drilling and Production in Oil and Gas Industry using Microsoft Azure. In 2024 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt) (pp. 50–54). IEEE. 2024 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt). https://doi.org/10.1109/itc-egypt61547.2024.10620581

# CLASSIFICATION OF KYIV SIDEWALK CHARACTERISTICS FROM STREET VIEW PHOTOS USING DEEP LEARNING METHODS

**Kozurak D.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** Ensuring an accessible urban environment is a crucial task for cities striving for inclusivity. However, systematic assessment of pedestrian sidewalk conditions remains a labor-intensive process that traditionally requires physical inspection or manual data annotation. This paper proposes an approach to automated classification of pedestrian infrastructure characteristics in the city of Kyiv based on street-level photographs from Google Street View and deep learning methods, as well as the construction of optimal routes for users with limited mobility. The classification task is solved as a set of independent problems using transfer learning on EfficientNet-B0 and DINOv2 (ViT-S/14) pre-trained models. Preliminary results show that EfficientNet-B0 achieves F1-score of 0.79 for tactile paving and 0.75 for surface type classification. The developed models are integrated into a road infrastructure classification system that constructs a weighted graph of Kyiv's pedestrian network to support optimal route planning via the A* algorithm.

**Keywords:** Deep Learning, Image Classification, Street View, Sidewalk Accessibility, Transfer Learning, EfficientNet, DINOv2, Urban Mobility, Route Optimization, OpenStreetMap.

**Introduction.** Ensuring an accessible urban environment is a highly important task for cities aiming for inclusivity. Nevertheless, systematic evaluation of pedestrian sidewalk conditions remains a labor-intensive process that traditionally requires physical surveys or manual data annotation [1]. Furthermore, while some maps may include accessibility information for individual sidewalks or streets, none of them is capable of offering routes optimized for users with limited mobility [2].

**The purpose of the work** is to develop an automated system for classifying pedestrian infrastructure characteristics in Kyiv using street-level imagery and deep learning, and to integrate the results into an accessible route planning application for users with limited mobility.

**Formulation of the problem.** The research addresses two problems simultaneously: automated classification of pedestrian infrastructure characteristics in the city of Kyiv based on street-level photographs from Google Street View and deep learning methods, and construction of optimal routes for users with limited mobility.

**Solving the problem.** Geographic data on roads and sidewalks in Kyiv was obtained from OpenStreetMap [3] via the Overpass API, yielding information on approximately 56,000 segments. Photographs of the corresponding sections were downloaded for each segment using the Google Street View Static API. Training labels were derived directly from OpenStreetMap attributes: surface type, smoothness, and presence of tactile paving. In total, over 5,000 photographs were collected for training.

Since the primary data from open sources were insufficient for identifying specific infrastructure characteristics — such as the presence of street lighting, ramps, and sidewalk width — the training dataset was supplemented with external datasets, including Road Surface Classification Dataset, Project Sidewalk, Sidewalk Gallery, and Mapillary. These resources provided representative arrays of verified urban infrastructure images, significantly enhancing model training quality.

The classification task is formulated as a set of independent problems. Some are binary (presence/absence of lighting, tactile paving, and ramps; whether road width exceeds the minimum acceptable value), while others are multi-class (surface type and quality, degree of road damage). A separate model is trained for each criterion using transfer learning based on two pre-trained models: EfficientNet-B0 [4] and DINOv2 (ViT-S/14) [5]. For each criterion, the model achieving the highest classification accuracy on test data is selected. In EfficientNet-B0, the original classification head is replaced with a custom two-layer fully connected network with Dropout

regularization. For DINOv2, the backbone is frozen, and only the classification head is trained, leveraging the powerful self-supervised features efficiently.

To compensate for class imbalance, a weighted cross-entropy loss function was employed. Training data augmentation included horizontal flipping, random rotation, and brightness/contrast variation. Optimization was performed using the Adam method with learning rate reduction every 5 epochs. Model quality was evaluated using accuracy and weighted F1-score on the test set.

Preliminary results indicate that EfficientNet-B0 demonstrates more stable performance across most evaluated criteria, achieving an F1-score of 0.79 for tactile paving and 0.75 for surface type. The DINOv2 model showed superior results for illumination classification (F1 = 0.76), but underperformed in other criteria. The lowest results were observed for the smoothness criterion — $F1 \approx 0.55$ — attributed to the subjectivity of OSM labels and the difficulty of visually distinguishing adjacent classes.

The developed models are integrated into a Kyiv road infrastructure classification system. This system constructs a weighted graph based on pedestrian segment coordinates, where vertices represent segment endpoints and intersections, edges represent the segments themselves, and edge weights correspond to segment lengths. Any route can thus be represented as a path in this graph, enabling optimal route search via mathematical algorithms such as A*. The system accepts graph edge coordinates as input, automatically downloads the corresponding photo, and returns predicted values for selected characteristics. The results can be used to build an accessibility map of the urban environment — a practical tool for urban planners, people with mobility impairments, and volunteer organizations.

**Conclusion.** Based on the accessibility map, an application for constructing optimal routes for users with limited mobility can be developed. Users can select their type of limited mobility (e.g., visual or hearing impairment, elderly persons, parents with strollers). Each segment is then assigned a coefficient based on its compliance with criteria relevant to the selected category (the lower the coefficient, the better the segment matches the user's needs), and the optimal route is computed using the A* algorithm. Future research plans include expanding the dataset through external open-source data, increasing the number of classified criteria, and evaluating the applicability of the trained models to other Ukrainian cities.

## References


1. Weld H. et al. Deep learning for automated sidewalk assessment: a survey. ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 54, No. 8.
2. Hwang H. et al. Synthetic data augmentation for robotic mobility aids to support blind and low vision people. Proceedings of RiTA. 2024.
3. OpenStreetMap Contributors. OpenStreetMap. URL: https://www.openstreetmap.org (accessed: 01.03.2026).
4. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. Proceedings of ICML. 2019. P. 6105–6114.
5. Oquab M. et al. DINOv2: Learning Robust Visual Features without Supervision. Transactions on Machine Learning Research. 2024.

# ANALYSIS OF CURRENT VIRTUAL REALITY SYSTEMS FOR EXPOSURE THERAPY OF SPECIFIC PHOBIAS IN ADOLESCENT PSYCHOTHERAPY

**Lomakin A., Bondarenko T.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** This article presents a comparative analysis of three leading virtual reality (VR) platforms for the implementation of exposure therapy for specific phobias in adolescents: PsyTechVR, XRHealth and oVRcome. The technical specifications of the platforms, hardware requirements, biometric capabilities, content types and pricing models are examined. Particular attention is paid to the ergonomic parameters of VR headsets in the context of the anatomical characteristics of the adolescent group, specifically interocular distance ranges. The current evidence base for the effectiveness of VRET in adolescent psychotherapy is analysed. Based on the results of the analysis, optimal application scenarios for each platform are identified: PsyTechVR – for personalised clinical work, XRHealth – for large medical institutions with standardised protocols, and oVRcome – for school psychology and remote support.

**Keywords:** Virtual reality in psychotherapy, Virtual Reality Exposure Therapy (VRET), Specific phobias, Adolescent psychotherapy, PsyTechVR, XRHealth, oVRcome, Biometric monitoring, Cognitive-behavioural therapy, Digital transformation of mental health.

**Introduction.** Specific phobias affect between 5% and 10% of children and adolescents [1] and, without timely intervention, frequently become predictors of severe anxiety and depressive conditions in adulthood [2, 3]. Traditional in vivo exposure, despite its proven efficacy, presents significant limitations in adolescent work: low motivational engagement, logistical challenges, and difficulties in recreating adequate stimulus conditions [4]. Virtual reality exposure therapy (VRET) responds to these challenges by providing a controlled, adjustable environment for the graduated confrontation of fear stimuli. The growing VR platform market offers solutions ranging from high-technology clinical systems with biometric feedback to mobile applications designed for self-directed use [5, 6, 7].

**Objective.** To conduct a systematic comparative analysis of leading VR platforms – PsyTechVR, XRHealth and oVRcome – based on technical, clinical and economic parameters, with the aim of identifying optimal scenarios for their application in exposure therapy for specific phobias in adolescents.

**Platform Analysis.** PsyTechVR is a professional clinical ecosystem integrating cognitive-behavioural therapy (CBT), exposure and response prevention (ERP), and EMDR techniques. Its principal innovation is the deployment of generative AI (MindGap module) to construct individualised therapeutic environments, including client-defined 'Safe Places' generated as 360° scenes within 30 seconds. The therapist controls exposure parameters in real time via the Launchpad interface – adjusting environmental variables such as weather, time of day, and specific triggers. The platform supports individual and group sessions (up to 20 concurrent users), the latter being particularly relevant for school-based psychological services. The biometric subsystem monitors heart rate variability (HRV), galvanic skin response (GSR), and eye-tracking patterns, yielding objective autonomic-nervous-system indices. Compatible hardware: Meta Quest 2/3/3s, Pico 4 Enterprise, HTC Vive Pro. Pricing: ~$120/month for single-licence private practice; corporate packages with hardware range from $1,599 to $2,540 per year.

XRHealth created the most comprehensively regulated platform in medical XR, with full compliance with FDA, HIPAA, and GDPR standards. The content library encompasses over 140 hyper-realistic clinical scenarios covering aerophobia, acrophobia, claustrophobia, needle phobia, and social anxiety. The system is designed exclusively for supervised professional use. A screen-mirroring function allows the therapist to observe the client's visual field in real time, facilitating timely support at peak-anxiety moments. The electrodermal response (EDR) sensor attached to the user's finger provides objective stress monitoring. A subscription costs approximately $299/month ('Software Only Plan'), with a 14-day free trial available; reimbursement via insurance programmes (e.g., Medicare) is possible in eligible healthcare systems.

oVRcome is oriented towards maximum accessibility beyond clinical settings. The platform utilises real-location 360° Ultra HD video (airports, lifts, open spaces) rather than CGI graphics, offering a high ecological validity that adolescents accustomed to high-quality video content tend to find compelling. A structured 6-week programme combines psychoeducation, relaxation, cognitive techniques, and graduated exposure. The Clinician Portal enables remote assignment of home-practice sessions and progress monitoring. Hardware requirements are minimal: any iOS or Android smartphone combined with a basic VR holder (e.g., Google Cardboard). Pricing: $19/month or $199/year for individual users; institutional group licences are available for educational organisations.

**Comparative Analysis of Hardware and Ergonomics.** The three standalone headsets most commonly integrated with clinical VR platforms – Meta Quest 3, HTC Vive XR Elite and Pico 4 Enterprise – differ substantially on parameters critical for adolescent use. A key ergonomic criterion is the interpupillary distance (IPD) range, given that the mean IPD in 12-year-olds may fall below 58 mm. The Meta Quest 3 (minimum IPD 58 mm) may therefore be technically unsuitable for younger adolescents. The HTC Vive XR Elite (IPD range 54–73 mm) offers the widest coverage of the adolescent population and additionally provides per-lens dioptre correction, enabling use without prescription eyewear – a significant comfort and immersion benefit. The Pico 4 Enterprise offsets its higher weight through rear-mounted battery placement, reducing anterior load and minimising neck strain during extended sessions [8].

Table 1

**Key technical characteristics of common VR hardware platforms**

| Characteristic | Meta Quest 3 | HTC Vive XR Elite | Pico 4 Enterprise |
|---|---|---|---|
| **Resolution (per eye)** | 1832×1920 | 1920×1920 | 2160×2160 |
| **Refresh rate** | 120 Hz | 90 Hz | 90 Hz |
| **FoV** | 104° horizontal | 110° diagonal | 105° diagonal |
| **IPD range** | 58–68 mm | 54–73 mm | 58–72 mm |
| **Weight** | 514 g | 625 g | 580 g |
| **Approx. price** | $500–650 | $700–800 | $1,100–1,600 |

**Evidence Base for VRET in Adolescents.** Recent meta-analytic evidence consistently supports the clinical validity of VRET. A meta-analysis of 33 randomised controlled trials comprising 3,182 participants demonstrated a significant reduction in anxiety symptoms compared to control conditions (SMD = −0.95) [7]. Adolescents, as a group characterised by high acceptance of digital technologies, exhibit a favourable response profile to VR-based interventions – particularly with respect to overcoming initial resistance and 'inhibitory anxiety', which often prevents agreement to in vivo exposure [1, 7].

In a study involving adolescents with social anxiety, six 60-minute VRET sessions produced significant reductions in SMA-scale scores sustained across a 6-month follow-up [1]. Research on acrophobia using Meta Quest 2/3-based systems demonstrated that three sessions of 30–40 minutes each were sufficient for a clinically significant reduction in fear, with participants reporting high perceived safety and control. Cybersickness symptoms (nausea, dizziness) were rare at high refresh rates; in the oVRcome trial, the mean Fast Motion Sickness scale score was 3.3/20 with no therapy discontinuations due to adverse effects [9].

**Strategic Recommendations.** Platform select scenarios for practice reflect the distinct market positioning of each system:

**PsyTechVR** is optimal for personalised intensive clinical work. AI-generated content and deep biometric integration make it the preferred choice for complex phobia cases and PTSD, where individual tailoring of the therapeutic environment is paramount.

**XRHealth** is recommended for large medical institutions and multi-specialist centres where FDA/HIPAA compliance, integration with electronic health records, and standardised protocol fidelity are non-negotiable requirements.

**oVRcome** is the leader in scalability and accessibility. Its minimal hardware requirements and realistic video stimuli make it the most practicable solution for school psychology services, hybrid therapy models, and self-guided patient work outside clinical settings.

**Conclusions.** A comparative analysis of VR platforms for VRET of specific phobias in adolescents yields the following generalisations. First, VRET has attained the status of a scientifically validated clinical approach: meta-analytic evidence (33 RCTs; N = 3,182; SMD = −0.95) confirms its superiority over control conditions, with effects sustained at 6-month follow-up. Adolescents demonstrate a particularly favourable response profile owing to high acceptance of digital technologies and characteristic 'inhibitory anxiety' that frequently obstructs in vivo exposure.

Second, none of the three platforms constitutes a universal solution. PsyTechVR excels in personalised clinical work through AI-driven content generation and deep biometric integration (HRV, GSR, eye tracking). XRHealth meets the regulatory and procedural demands of large healthcare institutions requiring FDA/HIPAA compliance. oVRcome implements a scalable accessibility model suited to educational settings and independent patient practice, partially compensating for the absence of hardware biometrics through structured self-report instruments.

Third, ergonomic parameters are clinically consequential: the Meta Quest 3's minimum IPD of 58 mm may render it technically unsuitable for younger adolescents, whereas the HTC Vive XR Elite (IPD from 54 mm; per-lens dioptre correction) provides the most comprehensive anatomical coverage of the age group. Neglecting this criterion risks degrading immersion quality and precipitating cybersickness symptoms and may discredit the intervention in the patient's perception.

Open research questions include the long-term effects of VRET (beyond 12 months), comparative efficacy of CGI versus 360° video for specific phobia subtypes, and optimal protocols for integrating VR sessions with conventional formats. The cultural and linguistic adaptation of platforms for Ukrainian-speaking populations warrants dedicated attention. Ultimately, effective platform selection must synthesise technical specifications, organisational capacity, and the developmental characteristics of the target group – a synthesis that determines whether exposure becomes a safe, measurable, and motivating process of overcoming fear.

## References


1. Beele, G., Liesong, P., Bojanowski, S., Hildebrand, K., Weingart, M., Asbrand, J., Correll, C. U., Morina, N., & Uhlhaas, P. J. (2024). Virtual Reality Exposure Therapy for Reducing School Anxiety in Adolescents: Pilot Study. *JMIR mental health, 11, e56235.* https://doi.org/10.2196/56235
2. Blondell, V. J., & Thomson, N. D. (2025). Virtual Reality as an Innovative Tool for Youth Mental Health. *Encyclopedia, 5(4), 215.* https://doi.org/10.3390/encyclopedia5040215
3. Li, L., Li, Q., Wang, J., Fu, Q., & Chi, M. (2025). Effects of different interventions on anxiety disorders in children and adolescents: a systematic review and bayesian network meta-analysis. *BMC psychiatry, 25(1), 809.* https://doi.org/10.1186/s12888-025-07227-y
4. Assa'edah Mahmud, A., Zakaria, H., Zaliman Mohd Yusoff, M., Ruzyanei Nik Jaafar, N., Baharudin, A., & Mohd Tamil, A. (2022). Brief Virtual Reality Exposure Therapy and Its Effects on Negative and Positive Emotions Among Healthy Working Adults: A Feasibility Study. *Alpha psychiatry, 23(5), 223–229.* https://doi.org/10.5152/alphapsychiatry.2022.21781
5. Capriola-Hall, N. N., Booker, J. A., & Ollendick, T. H. (2020). Parent- and Child-Factors in Specific Phobias: The Interplay of Overprotection and Negative Affectivity. *Journal of abnormal child psychology, 48(10), 1291–1302.* https://doi.org/10.1007/s10802-020-00662-3
6. Kothgassner, O. D., & Felnhofer, A. (2021). Lack of research on efficacy of virtual reality exposure therapy (VRET) for anxiety disorders in children and adolescents: A systematic review. *Neuropsychiatrie, 35(2), 68–75.* https://doi.org/10.1007/s40211-020-00349-7
7. Lomakin, A., & Baturin, M. (2025). The use of virtual reality in psychology: current state and prospects. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni H.S. Skovorody. Psykholohiia, 0(73), 99–121.* https://doi.org/10.34142/23129387.2025.73.07
8. VRcompare. (2026). Pico 4 Ultra vs HTC Vive XR Elite vs Meta Quest 3S (Comparison). *VRcompare, retrieved April 29, 2026.* https://vr-compare.com/compare?h1=W8bStYZ3H&h2=nlolwv0lx&h3=dC53TrTC0
9. Premkumar, P., Heym, N., Brown, D. J., Battersby, S., Sumich, A., Huntington, B., Daly, R., & Zysk, E. (2021). The Effectiveness of Self-Guided Virtual-Reality Exposure Therapy for Public-Speaking Anxiety. *Frontiers in psychiatry, 12, 694610.* https://doi.org/10.3389/fpsyt.2021.694610

# A STUDY ON METHODS FOR INTEGRATING MACHINE LEARNING ALGORITHMS INTO REACT-BASED WEB APPLICATIONS FOR PERSONALISED RECOMMENDER SYSTEMS IN E-COMMERCE

**Marchenko I., Kryvenko O., Balalaieva O., Serhiienko A.**
Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

**Abstract**. The development of hybrid architectures supporting personalised recommender systems in e-commerce remains an important challenge in modern web development. This study presents the results of designing a hybrid framework for React-based applications built on gRPC and TensorFlow.js architectures to reduce latency and improve business performance. The system employs both server-side and client-side approaches to model deployment at different levels. This paper aims to assess the effectiveness of the developed methods, which, when combined with React's asynchronous logic, demonstrate high performance. Experimental results obtained from the developed prototype are presented for the LightFM, NCF and ALS models. The findings confirm latency below 100 ms (45–62 ms), a 200% increase in CTR and a 58% improvement in conversion.

**Keywords**: Recommender systems, web application, machine learning, React, e-commerce, latency, hybrid architecture, conversion.

**Introduction**. Rapid e-commerce expansion and information overload necessitate effective personalised navigation [1, 2]. Consequently, machine learning-based recommender systems have become essential for maintaining competitiveness [3, 4]. However, their implementation is mainly hindered by a technological disparity between powerful server-side stacks used for training ML models (Python, TensorFlow, PyTorch) and client-side frontend frameworks such as React. This disparity results in increased latency in the delivery of recommendations, a decline in user experience and a negative impact on business metrics such as conversion and customer retention. Furthermore, other challenges include system scalability for processing high data volumes, the "cold start" problem for new users or items [5, 6], ensuring data privacy in compliance with GDPR and related legislation, as well as resource optimisation for real-time performance, where latency should fall within the 50-100 ms range. The investigation of methods for the seamless integration of machine learning algorithms directly into the client side within React-based applications represents a relevant research task for enabling real-time data processing.

**The purpose of this work.** This study is aimed at providing a comparative analysis and practical implementation of methods for integrating ML models in e-commerce web applications, while reducing latency and improving conversion. The object of the study is the operation processes of personalised recommender systems, while the subject concerns architecture solutions in integrating ML algorithms into the React environment.

**Formulation of the problem**. This study identifies optimal ML integration methods for React, focusing on reducing latency and improving business metrics. It includes developing asynchronous interfaces and conducting experimental research into method effectiveness under real-world e-commerce conditions.

**Solving the problem**. Three deployment strategies were evaluated: Server-Side Inference (high accuracy but 50-300 ms network latency), Client-Side Inference (sub-50 ms latency but resource-constrained), and a Hybrid Approach. The latter provides 'zero' interface latency by generating local session-based recommendations while asynchronously fetching global data from the server.

Protocol analysis shows that gRPC with Protobuf outperforms REST (30-100 ms vs 100-300 ms latency) due to binary serialization, enabling sub-100 ms latency and a 200% throughput increase for React-based ML applications.

RS algorithm selection for React-based applications depends on data nature, inference speed, and integration with the ML stack. While ALS (50-100 ms) faces 'cold start' issues and content-based filtering ignores interactions, the hybrid LightFM algorithm was chosen for balancing precision (0.28-0.35) and latency (40-90 ms) by combining preference data with item features.

LightFM is well-suited for TensorFlow.js integration, delivering results in under 80 ms and increasing CTR by 15-20%. For real-time operations, this system demonstrates 10-15% better performance than interaction-only models [8, 9]. Alternatively, neural collaborative filtering (NCF) can be used for session-based tasks [10] if supported by server-side backups to prevent latency.

The prototype is a React 18/TypeScript application utilizing a hybrid architecture with on-device inference for immediate results and server-side execution for complex computations. Three model types were adapted for this environment: LightFM and ALS, converted to ONNX for browser-based execution, and NCF, integrated via TensorFlow.js.

The prototype (React/Vite) was evaluated using MovieLens 1M and Amazon Reviews datasets, deployed via Vercel edge computing and AWS Kubernetes. Performance validation using k6 (up to 25,000 RPS) and Playwright measured p95 latency from request initiation to UI rendering, with results compared across different models (Table 1).

Table 1

**Performance Comparison**

| Model | Average response latency (95$^{th}$ percentile) | Recommendation precision among top-10 results | Memory (browser) |
|---|---|---|---|
| LightFM (ONNX + WebGL) | 62 ms | 0.33 | 48 MB |
| NCF (TF.js + WebGPU) | 78 ms | 0.36 | 71 MB |
| gRPC (BentoML + GPU) | 45 ms | 0.38 | – |

The prototype maintains response latency below 100 ms (avg. 45–62 ms) and precision (P@10) of 0.33–0.38. Performance is ensured via asynchronous loading, local caching, and fallback mechanisms (on-device computation), leading to a 200% CTR increase and 58% better conversion.

Flexible communication between the UI and server was achieved through various integration methods covering data exchange, model execution, and fallback mechanisms (Table 2).

Table 2

**Integration Methods**

| Method | Description | Technologies |
|---|---|---|
| REST + JSON | Traditional HTTP/1.1 | axios, FastAPI |
| gRPC + Protobuf | HTTP/2, binary serialisation | grpc-web, BentoML |
| ML-in-the-Browser (ONNX) | Client-side inference | onnxruntime-web, WebGL |
| Hybrid (fallback) | Browser initially → server in case of failure | ONNX + gRPC |

Load testing was conducted to measure response latency (p95) under varying request rates across the four integration approaches (Table 3).

Table 3

**Results of Response Latency Measurements (p95, ms)**

| Load (RPS) | REST | gRPC | Browser (ONNX) | Hybrid |
|---|---|---|---|---|
| 1,000 | 178 | 92 | 68 | 71 |
| 5,000 | 298 | 104 | 74 | 79 |
| 10,000 | 412 | 118 | 81 | 86 |
| 20,000 | 689 | 145 | 94 | 97 |

Figure 1 illustrates how response latency (p95) varies with increasing load (request rates per second).

A 14-day A/B test with 12,000 users compared a control group (Group A) to an experimental group using the hybrid system (Group B), with metrics summarised in Table 4.

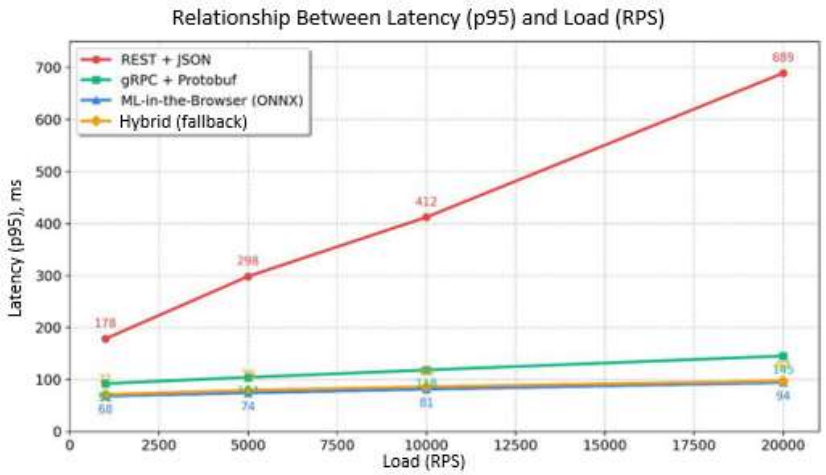



Fig. 1. Latency-RPS Chart

Table 4

**A/B Testing Results**

| Metrics | Group A (no RS) | Group B (with RS) | Δ (%) |
|---|---|---|---|
| Click-Through Rate (CTR) | 2.8% | 8.4% | +200% |
| Conversion | 3.1% | 4.9% | +58% |
| Average Order Value | 1,240 hryvnias | 1,580 hryvnias | +27% |
| Revenue Per User (7 days) | 38.4 hryvnias | 77.5 hryvnias | +102% |
| Retention Rate (D7) | 41% | 56% | +37% |
| Churn Rate | 59% | 44% | -25% |

The results show a clear trend: every additional 50 ms of latency leads to a decrease of approximately 1.8% in CTR.

**Conclusion**. The study confirms that a hybrid architecture combining ML-in-the-Browser (ONNX/WebGL) with gRPC inference reduces server-side latency by 50-70% compared to REST. Maintaining latency below 100 ms (avg. 45–62 ms) increases CTR by 200%, conversion by 58%, and customer lifetime value by 102%. To ensure such performance, it is recommended to use the gRPC protocol, ONNX model quantization (int8), edge computing infrastructure, and Skeleton UI for masking latency.

## References


1. Schafer, J. B., Konstan, J. A., Riedl, J.: E-commerce recommendation applications. Data mining and knowledge discovery, 5(1-2), pp. 115–153, (2001).
2. Smith, B., Linden, G.: Two decades of recommender systems at Amazon.com. IEEE Internet Computing, 21(3), pp. 12–18, (2017).
3. Resnick, P., Varian, H. R.: Recommender systems. Communications of the ACM, 40(3), pp. 56–58, (1997).
4. Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B.: Introduction to recommender systems handbook. In Recommender systems handbook, pp. 1–35. Springer, (2011).
5. Adomavicius, G., Tuzhilin, A.: Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 17(6), pp. 734–749, (2005).
6. Bobadilla, J., Ortega, F., Hernando, A., Gutiérrez, A.: Recommender systems survey. Knowledge-based systems, 46, pp. 109–132, (2013).
7. Koren, Y., Bell, R., Volinsky, C.: Matrix factorization techniques for recommender systems. Computer, 42(8), pp. 30–37, (2009).
8. Amatriain, X., Basilico, J.: Recommender systems in industry: A Netflix case study. In Recommender systems handbook, pp. 385–419. Springer, (2015).
9. Gomez-Uribe, C. A., Hunt, N.: The Netflix recommender system: Algorithms, business value, and innovation. ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS), 6(4), pp. 1–19, (2016).
10. Burke, R.: Hybrid recommender systems: Survey and experiments. User modeling and user-adapted interaction, 12, pp. 331–370, (2002).

# REINFORCEMENT LEARNING FOR ADAPTIVE AI OPPONENTS IN UAV SIMULATION

**Martyniuk M.Yu.[1], Vakaliuk T.A.[1,2,3,4]**
[1]Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
[2]Institute for Digitalisation of Education of the NAES of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]Kryvyi Rih State Pedagogical University, 54 Universytetskyi Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine
[4]Academy of Cognitive and Natural Sciences, 54 Universytetskyi Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine

**Abstract.** The increasing operational role of unmanned aerial vehicles (UAVs) in security, infrastructure monitoring, and complex missions has accelerated demand for realistic and adaptive simulation environments for operator training. Existing UAV simulators, as well as commercial applications, predominantly implement adversary behaviour through scripted finite state machines or decision trees, resulting in predictable and non-adaptive agents that limit training effectiveness. This paper investigates the integration of reinforcement learning (RL) algorithms directly within an Unreal Engine-based drone simulator to enable adaptive adversarial behaviour. Three approaches are systematically compared: Decision Trees, Q-Learning, and Proximal Policy Optimisation (PPO), evaluated across the criteria of interpretability, scalability, real-time performance, adaptivity, and implementation effort. The theoretical foundations of each method are outlined, including the Bellman equation underlying Q-Learning and the policy gradient framework underpinning PPO. Experimental prototyping and qualitative analysis demonstrate that tabular Q-Learning, applied with systematic discretisation of continuous state and action spaces, achieves the most effective balance for real-time in-engine deployment. The proposed architecture eliminates the external-process bottleneck common in existing RL-simulator integrations, enabling tighter coupling between the learning agent and the simulation loop. The findings provide practical guidance for developers of training simulators seeking to incorporate adaptive AI opponents without the overhead of deep learning inference.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, drone simulator, reinforcement learning, Q-Learning, proximal policy optimisation, adaptive adversarial behaviour, Unreal Engine, UAV training

**Introduction**. In the context of modern security challenges, unmanned aerial vehicles (UAVs) have become vital tools for monitoring airspace, protecting critical infrastructure, and supporting complex operations. Their effectiveness in surveillance, situational awareness, and high-precision interventions has accelerated advancements in UAV technologies and operator training methodologies.

**Goal of the article**. The goal of this article is to investigate and compare reinforcement learning-based approaches – specifically Q-Learning, Proximal Policy Optimisation (PPO), and Decision Trees – for implementing adaptive adversarial agent behaviour within a UAV drone simulator developed in Unreal Engine, in order to identify the most suitable method for real-time, in-engine deployment.

**Problem statement.** Modern UAV simulators and commercial applications predominantly rely on scripted finite state machines or decision trees for adversary control. These approaches produce predictable, non-adaptive behaviour across repeated training sessions, which undermines both experimental validity and operator preparation effectiveness. Furthermore, reinforcement learning logic in existing platforms is typically hosted in external processes, introducing communication overhead and hindering real-time performance. There is a lack of lightweight, natively integrated RL solutions that support transparent, adaptive adversarial agents within a continuous simulation loop.

**Results**. In recent years, many drone simulators have appeared, from hobbyist training tools to military and research platforms. They provide useful environments for pilot familiarisation, flight-physics experiments and mission rehearsal, but most still lack adaptive AI targets that learn from operator behaviour.

Research on autonomous UAVs typically relies on a small set of mature simulators that balance physics fidelity, sensor realism and integration with learning frameworks. Microsoft AirSim, for example, offers realistic RGB-D and LiDAR sensors and convenient TensorFlow/PyTorch integration via a Python API, while Gazebo with PX4 and MAVROS provides a flexible physics and autopilot stack [1, 2, 4]. In both ecosystems, however, reinforcement-learning policies are usually trained outside the engine, in Python or ROS processes that communicate over RPC. This supports rapid experimentation but keeps agents “out-of-engine”

and introduces extra latency and system complexity. Commercial Steam titles and hobbyist projects deliver polished visuals and flight realism, yet their opponents are typically scripted via finite state machines or decision trees without any learning, so behaviour remains predictable over repeated sessions [6].

Despite their differences, these platforms share key limitations for adaptive target behaviour. RL logic is usually hosted in a separate process, increasing communication overhead and complicating deployment. Because learning runs outside the main simulation loop, developers cannot easily inspect policy internals (e.g. evolving Q-values) or tune hyperparameters interactively, so feedback is indirect rather than tightly coupled to gameplay. There is also no native support for lightweight, tabular RL based on systematic discretisation of continuous state and action spaces: distance, heading or velocity bins must be hand-crafted in external scripts, fragmenting code across languages and tools. Finally, adversary behaviour in many commercial and hobbyist simulators remains locked in fixed behaviour trees or state machines that do not adapt over repeated encounters, undermining both challenge and experimental validity.

Reinforcement Learning (RL) is a class of machine learning paradigms in which an agent learns to make decisions by interacting with an environment and receiving scalar rewards. Unlike supervised learning, where the correct output is provided, RL emphasises learning through trial and error to maximise cumulative reward over time [7]. Two fundamental approaches dominate classical RL: value-based methods, which estimate the expected return (value) of actions in given states (e.g., Q-Learning [3]), and policy-based methods, which directly optimise a parameterised policy that maps states to action probabilities (e.g., Policy Gradient) [8]. Recent advances have combined value and policy methods into actor-critic algorithms to leverage both stability and sample efficiency [4].

Within value-based methods, Q-Learning iteratively updates estimates of the action-value function Q(s, a) according to the Bellman equation:

$$Q(s_t, \alpha_t) \leftarrow Q(s_t, \alpha_t) + \alpha[r_{t+1} + \gamma \max_{\alpha} Q(s_{t+1}, \alpha) - Q(s_t, \alpha_t)], \quad (1)$$

where $\alpha$ is the learning rate and $\gamma$ the discount factor. Q-Learning is model-free, does not require an explicit environmental model, and converges to optimal Q-values under standard assumptions [3]. However, it suffers from scalability issues in high-dimensional or continuous spaces.

Policy Gradient methods directly adjust policy parameters $\theta$ by following the gradient of expected return $J(\theta)$. The reinforce algorithm, for example, updates parameters as

$$\theta \leftarrow \theta + \alpha \nabla_\theta \log \pi_\theta(\alpha_t|s_t) G_t, \quad (2)$$

where $G_t$ is the return from time t [8]. These methods handle continuous actions naturally but can exhibit high variance and require careful tuning.

Actor-Critic algorithms combine both: an actor updates the policy, while a critic estimates a value function to reduce variance [4]. Proximal Policy Optimisation (PPO) improves on vanilla actor-critic by imposing a trust-region constraint on policy updates, ensuring stability through the clipping of the probability ratio between the old and new policies [5].

When selecting an AI decision-making algorithm for a drone simulator, three approaches were considered:

Decision Trees are non-parametric, tree-structured models that split the state space into regions based on feature thresholds (e.g., obstacle proximity, line of sight). They are interpretable and fast at runtime, but their decision boundaries become brittle as complexity grows. In our experiments, integrating a Decision Tree yielded clear, readable behaviours but became unwieldy once more than a dozen splitting criteria were introduced. Maintenance and extension for new behaviours required substantial manual restructuring, making it unsuitable for dynamic, evolving combat scenarios.

Q-Learning offers a value-based RL method that is conceptually simple and integrates easily with discrete state action spaces [3]. It demonstrated stable convergence in our prototyping when

the environment was partitioned into a manageable number of “sections” based on the distance to the target. Its tabular form, however, limits application to high-dimensional observations without function approximation. Nevertheless, Q-Learning’s transparency and low computational overhead made it attractive for real-time simulation.

Proximal Policy Optimisation (PPO) is a state-of-the-art policy-based method that handles continuous state and action spaces cleanly [5]. PPO was appealing due to its sample efficiency and robust policy updates. However, integrating PPO required a neural network runtime, and policy evaluation incurred significant inference cost per timestep, complicating real-time constraints.

**Conclusions**. Decision Trees offer high interpretability and fast runtime, but become unmanageable as scenario complexity grows, making them unsuitable for dynamic adversarial environments. PPO, while delivering excellent adaptivity and scalability, requires a neural network runtime that imposes significant inference costs per timestep, complicating real-time integration. Q-Learning demonstrates the best balance of interpretability, real-time performance, and adaptivity for the given simulation context. Its tabular form, combined with systematic state discretisation (distance, heading, velocity bins), enables stable convergence with low computational overhead, making it the recommended approach for native in-engine adversarial agent implementation. The results confirm that lightweight tabular RL methods remain competitive for real-time UAV simulation when continuous spaces are properly discretised, and that tight coupling between the RL logic and the simulation loop yields more controllable and inspectable agent behaviour.

## Referenes


1 Madaan, R., Gyde, N., Vemprala, S., Brown, M., Nagami, K., Taubner, T., Cristofalo, E., Scaramuzza, D., Schwager, M., Kapoor, A. AirSim Drone Racing Lab. Proceedings of the NeurIPS 2019 Competition and Demonstration Track (Proceedings of Machine Learning Research), vol. 123, pp. 177–191, 2020. URL: https://proceedings.mlr.press/v123/madaan20a.html.

2 Puente-Castro, A., Rivero, D., Pedrosa, E., Pereira, A., Lau, N., Fernandez-Blanco, E. Q-Learning based system for Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles swarms in obstacle environments. Expert Systems with Applications, vol. 235, Art. no. 121240, 2024. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.121240. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417423017426.

3 Watkins, C. J. C. H., Dayan, P. Q-learning. Machine Learning, vol. 8, no. 3–4, pp. 279–292, 1992. DOI: 10.1007/BF00992698. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/BF00992698.

4 Mnih, V., Badia, A. P., Mirza, M., Graves, A., Lillicrap, T. P., Harley, T., Silver, D., Kavukcuoglu, K. Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learning. In: Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning (ICML 2016), Proceedings of Machine Learning Research, vol. 48, pp. 1928–1937, 2016. URL: https://proceedings.mlr.press/v48/mniha16.html.

5 Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., Klimov, O. Proximal Policy Optimization Algorithms. arXiv preprint arXiv:1707.06347, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1707.06347. URL: https://arxiv.org/abs/1707.06347.

6 Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., Antiga, L., Desmaison, A., Köpf, A., Yang, E., DeVito, Z., Raison, M., Tejani, A., Chilamkurthy, S., Steiner, B., Fang, L., Bai, J., Chintala, S. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. In: Advances in Neural Information Processing Systems 32 (NeurIPS 2019), pp. 8026–8037, 2019. URL: https://papers.neurips.cc/paper_files/paper/2019/hash/bdbca288fee7f92f2bfa9f7012727740-Abstract.html.

7 Epic Games. Programming with C++ in Unreal Engine. Unreal Engine Documentation, n.d. URL: https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/programming-with-cplusplus-in-unreal-engine.

8 Synopsys. What is Reinforcement Learning & How Does AI Use It? Synopsys Glossary, n.d. URL: https://www.synopsys.com/glossary/what-is-reinforcement-learning.html.

# BENCHMARKING A CHESS ENGINE ON LIMITED ENDGAMES

**Moroz Y.[1], Dudnik A.[1,2,3], Odribets N.[3]**
[1]Interregional Academy of Personnel Management, 2 Frometivska St., Kyiv, 03039, Ukraine
[2]Kyiv National Taras Shevchenko University, 60 Volodymyrska St., Kyiv, 01033, Ukraine
[3]Open International University of Human Development «Ukraine», Lvivska Str., 23, Kyiv

**Abstract**. This paper presents the analysis of the performance of the world's strongest chess engine on endgames up to eight pieces. To achieve this, we used Stockfish 18 and three free open-source endgame tablebases for large-scale testing. We generated a set of balanced chess positions with at least one pair of opposing pawns and tested the engine's intuition on them. We discussed the positions and piece configurations which happened to be difficult for the engine to identify the optimal move immediately. The results of the study could contribute to improving chess engines' understanding of few pieces' endgames under limited search conditions.

**Keywords**: chess, endgames, retrograde analysis, tablebase, Gaviota, Syzygy, op1, Stockfish.

**Introduction**. As artificial intelligence influenced all areas of our lives, it also changed computer chess. After the groundbreaking algorithm by AlphaZero using reinforcement learning from games of self-play [1], the evaluation function of all top engines has undergone a massive change. In 2023, the strongest chess engine Stockfish removed a handcrafted evaluation as it became unimportant for the engine's strength, focusing on a neural network-based approach [2]. In previous works we compared players' ratings with their moves [3] and chess engines [4], while in this research we decided to benchmark a chess engine on limited endgames.

Claude Shannon estimated the number of possible positions as $4.63 \times 10^{42}$ [5], which was recently re-evaluated by John Tromp as $4.82 \times 10^{44}$ [6], so solving chess soon seems to be unfeasible. However, in past decades, research has focused on solving limited endgames. The mathematical justification of the algorithm was already present in Ernst Zermelo's work [7] and later formalized by John von Neumann [8]. In 1965, Richard Bellman proposed to solve chess and checkers endgames backwards using 'retrograde analysis' [9]. Thomas Ströhlein [10] and Ken Thompson [11] pioneered creating endgame tablebases (all formulae and the algorithm is described in our full-text paper). Now we have solutions for all endgame positions with up to seven pieces (423,836,835,667,331 positions). The most recent research was done in February 2026 by Marc Bourzutschky, who shared with Lichess a subset of eight-piece endgames [12].

There were several attempts to evaluate chess engines on endgame tablebases. One of the most recent was done by Rejwana Haque, Ting Wei, and Martin Müller, who evaluated Leela Chess Zero on 3- and 4-piece endgame tablebases [13]. Later, Quazi Sadmine, Asmaul Husna, and Martin Müller compared Leela Chess Zero and Stockfish on 3-, 4-, and 5-piece endgames [14]. In our study, we tried to use more pieces and get more insights of engine's decisions.

**The purpose of the work** was to find out how close today's best engine's static evaluation is to perfect play in positions where the ground truth is available. The results showed that the engine performed very well on most types of endgames, but when the queens were present on the board, it was much harder for the engine to identify the best move instantly.

**Formulation of the problem**. While engines already achieved superhuman performance in chess, they still fail to instantly evaluate positions perfectly. Most engines need some time or node exploration to search through the tree of possible variations to provide the best move. As the ground truth for limited endgame positions is available through tablebases, we need to find cases where neural network evaluation function still struggles.

**Solving the problem**. In our first experiment, we generated a set of random endgame positions from three to eight pieces using Python 3.14 and configured the strongest [15] and most successful [16] chess engine Stockfish 18 [17] to depth 1. Except for three- and five-piece positions, which contained one pawn only, all the others had at least one opposing pair of pawns. To ensure balanced positions, we mirrored the same material for both colors. In even numbers of pieces, the material is exactly the same, while in positions with an odd number of pieces, White was up a pawn. One half of the positions in each configuration are winning, and the other half is drawn.

Table 1

**Number of Stockfish's Mistakes and Inaccuracies on limited endgames**

| Pieces | Configuration | Positions | W→L | W→D | D→L | WDL | DTM | DTMLoss |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | KPk | 10000 | 0 | 18 | 0 | 18 | 1585 | 6296 |
| 4 | KPkp | 10000 | 11 | 77 | 117 | 205 | 606 | 1930 |
| 5 | KQPkq | 10000 | 2 | 692 | 43 | 737 | 1111 | 22164 |
| 5 | KRPkr | 10000 | 0 | 414 | 19 | 433 | 1464 | 13310 |
| 5 | KBPkb | 10000 | 0 | 242 | 1 | 243 | 745 | 4444 |
| 5 | KNPkn | 10000 | 0 | 229 | 0 | 229 | 1086 | 7108 |
| 6 | KQPkqp | 10000 | 28 | 1039 | 148 | 1215 | - | - |
| 6 | KRPkrp | 10000 | 14 | 503 | 258 | 775 | - | - |
| 6 | KBPkbp | 10000 | 1 | 237 | 25 | 263 | - | - |
| 6 | KNPknp | 10000 | 0 | 351 | 20 | 371 | - | - |
| 7 | KQPPkqp | 10000 | 6 | 502 | 114 | 622 | - | - |
| 7 | KRPPkrp | 10000 | 4 | 357 | 81 | 442 | - | - |
| 7 | KBPPkbp | 10000 | 1 | 263 | 18 | 282 | - | - |
| 7 | KNPPknp | 10000 | 1 | 267 | 20 | 288 | - | - |
| 8 | KQPPkqpp | 10000 | 73 | 576 | 376 | 1025 | - | - |
| 8 | KRPPkrpp | 10000 | 29 | 349 | 352 | 730 | - | - |
| 8 | KBPPkbpp | 10000 | 13 | 213 | 211 | 437 | - | - |
| 8 | KNPPknpp | 10000 | 18 | 250 | 290 | 558 | - | - |
| Total | | 180000 | 201 | 6579 | 2093 | 8873 | 6597 | 55252 |

To probe positions, we used python-chess tools [18], 3-5-piece Miguel A. Ballicora's Gaviota tables [19], 6-7-piece Bojun Guo and Ronald de Man's Syzygy tables [20], and 8-piece Yakov Konoval and Marc Bourzutschky's Op1 tables [21]. Although Syzygy and Op1 provide the additional metrics, such as DTZ (depth to zeroing) and DTC (depth to conversion), respectively, we decided to ignore them because minimizing their values does not guarantee the fastest win, so we used WDL (win/draw/loss) and DTM (depth to mate) instead. Table 1 and Figure 1 present the key findings of the first experiment of our study.

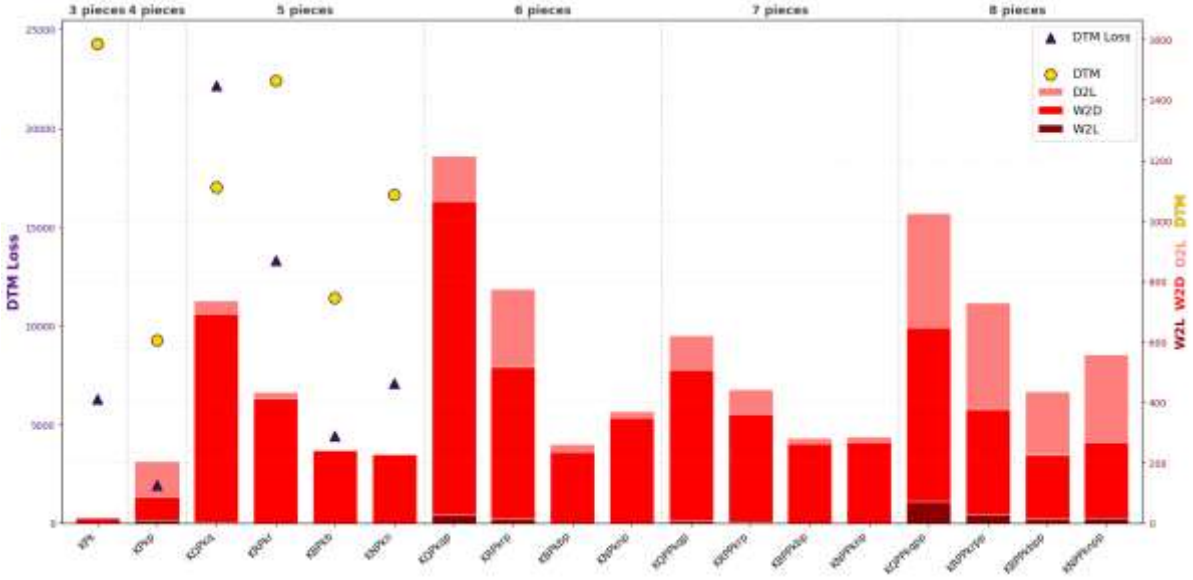



Fig. 1. Barplot of the mistakes and inaccuracies made by the engine on each piece configuration

**Conclusion**. Our findings show that without search, Stockfish 18 makes about 4.9% of mistakes on random balanced positions with at least one opposing pair of pawns, except for 3- and 5-piece positions, which had one pawn only. Also, it was much harder for the engine's evaluation function to identify the best move with major pieces on the board. Most big mistakes, which flipped the state from winning to losing, were made in 8-piece positions with queens.

In future work, we will try many more different piece configurations without the opposing pawns condition. We will also generate a much larger set of random positions. We also plan to experiment with different search conditions for the engine by testing shallow and moderate depths. Moreover, we will try to compare several other strong open-source engines.

## References


1. Zahavy, T., Veeriah, V., Hou, S., Waugh, K., Lai, M., Leurent, E., Tomašev, N., Schut, L., Hassabis, D., & Singh, S. (2023). Diversifying AI: Towards Creative Chess with AlphaZero. *arXiv:2308.09175*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09175
2. VandeVondele J. (2023, July 11). *Remove Classical Evaluation*. Github. https://github.com/official-stockfish/Stockfish/commit/af110e0
3. Dudnik, A., Moroz, Y., Leshchenko, O., Makhovych, O., & Kolisnyk, I. (2024). An Intelligent System For Analyzing The Dependence Of A Chess Player's Rating On Inaccurate Moves. In *ISS@ IT&I* (pp. 93-102). https://ceur-ws.org/Vol-3933/Paper_8.pdf
4. Moroz, Y. (2025). EVOLUTION OF COMPUTER CHESS. *Publishing House "Baltija Publishing"*. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-602-7-10
5. Gourion, D. (2022). An upper bound for the number of chess diagrams without promotion. *ICGA Journal*, *44*(2), 44-55. https://doi.org/10.3233/ICG-220210
6. Tromp, J. (2022, May 9). *Chess Position Ranking*. Github. https://github.com/tromp/ChessPositionRanking
7. Hjeij, M., & Vilks, A. (2023). A brief history of heuristics: how did research on heuristics evolve? *Humanities and social sciences communications*, *10*(1), 64. https://doi.org/10.1057/s41599-023-01542-z
8. von Neumann, J., & Morgenstern, O. (2024). Structure of the Theory: Solutions and Standards of Behavior. In *The Foundations of Price Theory Vol 4* (c. 307–324). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003547983-14
9. Edwards, J. (2025). Chess: Toward a Methodological Solution of Chess. *ICGA Journal*, *47*(4), 176-181. https://doi.org/10.1177/13896911251392420
10. Gomboc, D., Shelton, C. R., Miner, A. S., & Ciardo, G. (2024). Comparing Lossless Compression Methods for Chess Endgame Data. *European Conference on Artificial Intelligence*. https://doi.org/10.3233/FAIA240982
11. Schaeffer, J. (2022). (Game-) tree searcher search. *ICGA Journal*, *44*(2), 67-69. https://doi.org/10.3233/ICG-220212
12. Lichess (2026, February 7). *Op1 - Partial 8-piece tablebase available*. https://lichess.org/@/Lichess/blog/op1-partial-8-piece-tablebase-available/1ptPBDpC
13. Haque, R., Wei, T. H., & Müller, M. (2022). On the Road to Perfection? Evaluating Leela Chess Zero Against Endgame Tablebases. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 142–152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11488-5_13
14. Sadmine, Q. A., Husna, A., & Müller, M. (2024). Stockfish or Leela Chess Zero? A Comparison Against Endgame Tablebases. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 26–35). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54968-7_3
15. CCRL (n.d.). *Rating list*. Retrieved May 24, 2026, from https://computerchess.org.uk/4040/
16. TCEC (n.d.). *The TCEC Grand Champions*. Retrieved May 24, 2026, from https://tcec-chess.com/
17. Stockfish. (2026, January 31). *Stockfish 18*. https://stockfishchess.org/blog/2026/stockfish-18/
18. Fiekas, N. (n.d.). *python-chess: a chess library for Python*. Retrieved May 24, 2026, from https://python-chess.readthedocs.io
19. Ballicora, M. A. (n.d.). *Endgame Tablebases*. Github. Retrieved May 24, 2026, from https://github.com/michiguel/Gaviota-Tablebases
20. De Man R. (n.d.). *Syzygy endgame tablebases*. Github. Retrieved May 24, 2026, from https://github.com/syzygy1/tb
21. Kornder, A. (2026, February 9). o*p1*. Github. thttps://github.com/lichess-org/op1

# APPLYING MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ANALYZE E-COMMERCE SALES FOR ENHANCED MARKETING STRATEGY DEVELOPMENT

**Moskalenko V.[1,2], Kirpichov Yu.[1], Fonta N.[1], Kosenko V.[1]**
[1]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2]Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhia, Ukraine

**Abstract**. It is proposed to use machine learning methods to address the problem of improving marketing strategies in online stores, marketplaces, and other types of e-commerce businesses characterized by high assortment volatility. Customer grouping is performed using behavioral segmentation through RFM market analysis, homogeneous customer groups are identified using the K-Means clustering algorithm, purchases are analyzed and the geographical location of regular customers is determined using the DBSCAN method, and patterns of frequently co-purchased goods are identified for bundling strategies using the Apriori associative rule-mining algorithm.

**Keywords**: Segmentation, Machine Learning, Clustering Method, RFM Analysis, K-Means, DBSCAN, Apriori Algorithm, Marketing Strategy

**Introduction**. The effectiveness of marketing solutions largely depends on the quality of data analysis related to customers, products, orders, and the geography of demand in modern e-commerce [1]. Traditional approaches to sales analytics for online stores and marketplaces with a large number of product lines and a highly dynamic assortment are ineffective, as they do not enable the identification of market trends, the formation of stable market segments [2], or the development of effective marketing strategies [3]. Methods for analyzing sales and customer data in contemporary online retail are shifting from simple sales reporting to predictive and prescriptive analytics of customer behavior in real time using artificial intelligence methods [4, 5], particularly machine learning techniques [6]. Algorithms for analyzing e-commerce users' purchase histories, product-browsing behavior, and other related data are continuously being developed and improved [7]. For example, user profiles are created using collaborative filtering algorithms to build a user similarity matrix and generate real-time product recommendations, enabling timely measures to reduce potential losses [7, 8].

**The purpose of the work** is to develop machine learning methods for segmenting online marketplace products, identify patterns in purchases in order to improve marketing strategies.

**Formulation of the problem**. Based on the conducted research, it has been concluded that the tasks of forming an effective product assortment for online stores and marketplaces, developing strategies for promoting goods from various manufacturers [9], designing pricing policies [10], generating recommendations, and addressing other aspects of marketing strategy based on the analysis of product sales [11], customer purchases [12], customer behaviour [13], and other sales indicators to maintain competitiveness [14] remain highly relevant.

The following research problem has been formulated: to segment customers and the product market of online stores, marketplaces, and other types of e-commerce with high assortment volatility in order to obtain the data necessary for improving marketing strategies.

**Solving the problem**. It has been proposed to use machine learning methods to solve marketing problems. RFM analysis is used for customer segmentation (Recency, Frequency, Monetary) [15]. It is a behavioural segmentation method that classifies customers based on their last purchase (Recency), Frequency of purchases (Frequency), and total spending on purchases (Monetary). Scores were assigned to each dimension from 1 to 5, which made it possible to identify the following segments: Champions ($R \geq 4$, $F \geq 4$, $M \geq 4$); Loyal Customers ($F \geq 4$, $M \geq 4$); Big Spenders ($M \geq 5$, $F \geq 2$); Potential Loyalists ($R \geq 4$, $2 \leq F \leq 3$); New Customers ($R \geq 4$, $F \leq 2$); At Risk ($R \leq 2$, $F \geq 3$, $M \geq 3$); Lost Customers ($R \leq 2$, $F \leq 2$, $M \leq 2$). Customer segmentation based on RFM analysis is shown in Fig. 1. Based on the data obtained, marketers can identify who their main customers are, which customers can go to competitors, who can be a valuable customer, which customers are needed and can be retained by certain measures, who is most likely to respond to marketing campaigns. The K-Means clustering algorithm was used to isolate homogeneous groups of clients [16].

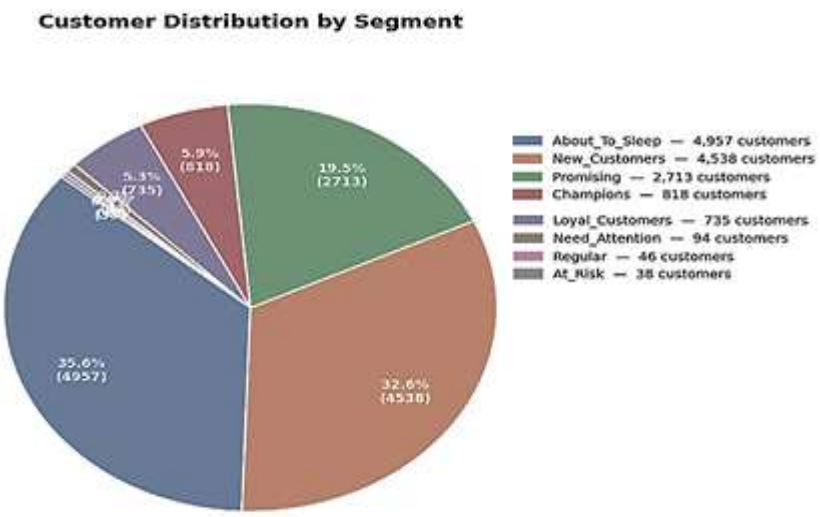



Fig. 1. Customer segmentation based on RFM analysis

As a result of applying the K-Means algorithm, customers were grouped into homogeneous clusters, namely: k1 – customers with low purchase potential, K2 – with high purchase potential, and K3 – with medium purchase potential for purchasing goods from the online store.

The DBSCAN algorithm is used to analyze purchases and determine the geographical location of regular customers. This made it possible to identify clusters of purchasing activity that take geographical factors into account. (Fig. **2**).

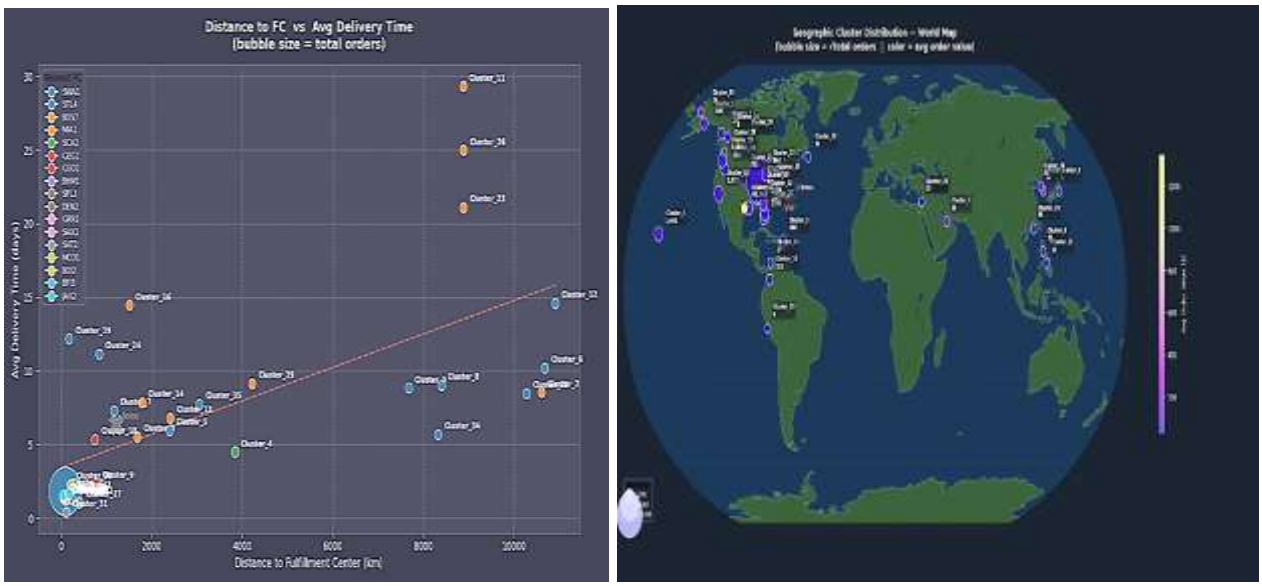



Fig. 2. Customer segmentation based on the DBSCAN clustering algorithm

The results obtained are the basis for decision-making to expand the presence of trading companies in certain regions of the world.

A separate area of research is the analysis of product combinations in orders, which allows you to identify patterns of commonly purchased goods and develop marketing strategies for bundling. A bundling strategy involves combining several goods or services together as a single package for purchase. Implementing a bundling strategy will increase the average order value, stimulate sales of low-performing products, and improve the perception of purchase value for the customer. The Apriori algorithm was used to perform analysis [17].

**Conclusion.** The use of machine learning methods to address the challenge of developing effective marketing strategies for online stores, marketplaces, and other types of e-commerce businesses with highly volatile assortments is examined. Customer grouping is performed using behavioral segmentation through RFM market analysis, while homogeneous customer segments are identified using the K-Means clustering

algorithm. Purchase data is analysed, and the geographical distribution of regular customers is determined using the DBSCAN method. Additionally, patterns of frequently co-purchased products are identified to support bundling strategies based on the Apriori associative rule-mining algorithm.

Together, these methods form the foundation of an information technology system designed to support the development of effective marketing strategies, including assortment planning, warehouse location decisions, and product offering optimization. The implementation of such a system can improve resource allocation efficiency, enhance the quality of commercial operations, and increase the competitiveness of e-commerce marketplaces.

## References


1. Sulova, S. A Conceptual Framework for the Technological Advancement of E-Commerce Applications. Businesses, 2023, 3, P. 220-230. 10.3390/businesses3010015.
2. Wang, Yu-B., Chen, P. Y.: Official online brand stores or online marketplaces? exploring innovation in consumer intentions. *Journal of Innovation & Knowledge*, 2024, 9 (3), 100541. https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100541.
3. Maier E., Wieringa, J.: Acquiring customers through online marketplaces? The effect of marketplace sales on sales in a retailer's own channels. *International Journal of Research in Marketing*, 2021, 38 (2), P. 311-328. https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2020.09.007.
4. Muhammad A., etc.: Customer Behavior Analysis In E-Commerce. *RPubs by RStudio.* URL: https://rpubs.com/Mariyam008/wqd7004G12CBA
5. Basit, A. O., Jagadeesh, S.: Predictive Analytics for Customer Purchase Behavior Using Machine Learning in ECommerce. *SSRN.* http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.6235631
6. Moradi, N., Jalilian,M.: Analyzing the customer purchase data of an online shopping store by data mining: A real case study in Iran. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 2025, 14(1), P. 152-176. https://doi.org/10.22105/riej.2024.468414.1458
7. Shen, W.: Analysis of E-commerce customer consumption data and traffic risk detection based on user recommendation algorithm. *Results in Engineering*, 2025, 27, 106255. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106255.
8. Khan, Z., Hussain, M. I., Iltaf, N., Kim, J., Jeon, M.: Contextual recommender system for E-commerce applications. *Applied Soft Computing*, 2021,109, 107552. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107552.
9. Akin, M. S. Enhancing e-commerce competitiveness: A comprehensive analysis of customer experiences and strategies in the Turkish market. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity,* 2024, 10 (1), 100222. https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100222.
10. Chowdhury, Md & S., etc.: Optimizing E-Commerce Pricing Strategies: A Comparative Analysis of Machine Learning Models for Predicting Customer Satisfaction. *The American Journal of Engineering and Technology*, 2024, 06, P. 6-17. https://doi.org/10.37547/tajet/Volume06Issue09-02
11. Zhang, B., Tseng, M.-L., Qi, L., Guo, Y., Wang, C.-H. A comparative online sales forecasting analysis: Data mining techniques. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176, 108935.https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108935.
12. Cirqueira, D., Hofer, M., Nedbal, D., Helfert, M., Bezbradica, M.. Customer Purchase Behavior Prediction in E-commerce: A Conceptual Framework and Research Agenda. In: Ceci, M., Loglisci, C., Manco, G., Masciari, E., Ras, Z. (eds) *New Frontiers in Mining Complex Patterns. NFMCP 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2020, 11948. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48861-1_8
13. Sharma, S., Waoo, A.A. An efficient machine learning technique for prediction of consumer behaviour with high accuracy. *Int J Comput Artif Intell*,2023, 4(1), P. 12-15. DOI: 10.33545/27076571.2023.v4.i1a.59
14. Chen, X.. Research on the E-commerce Competition: Game Analysis Between Taobao and JD. *Highlights in Business, Economics and Management*, 2025, 60, P. 165-174. https://doi.org/10.54097/btn9jc33
15. Ferry, I., Fitroh, A., Wijayanti, A.: E-Commerce Customer Segmentation Based on RFM Analysis Using DBSCAN Algorithm to Improve Marketing Strategy. Jurnal EMT KITA, 2025, 9. P. 1850-1859. DOI: https://doi.org/10.35870/emt.v9i4.5375
16. Customer segmentation using k-means clustering for targeted marketing in banking. *International Journal of Artificial Intelligence & Machine Learning (IJAIML)*, 2024, 3(2), P. 89–94. https://doi.org/10.5281/zenodo.13627403.
17. Lee, C.-W., Ahmatang. Market Basket Analysis Using Apriori Algorithm: Identifying Consumer Purchase Patterns for Strategic Business Decisions. *Journal of Risk and Control*, 2025, 12(1), P.101-114. https://doi.org/10.47260/jrc/1216

# DEVELOPMENT OF A MULTIMODAL DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION SYSTEM FOR EMBEDDED SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**Nazarkevych M.[1], Nazarkevych A.[1], Kuziv O.[1], Nakonechnyi N.[1], Stechkevych O. Yurynets R.[1], Vozna O.[2]**

[1]Lviv Polytechnic National University, 12, Stepan Bandera str, Lviv, 79013, Ukraine

[2]Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology, 50 Pekarska str., Lviv, 79010, Ukraine

**Abstract.** The paper presents the development and experimental validation of a multimodal data analysis and visualization system for embedded platforms, which is based on the use of an optimized 3D Residual Network architecture instead of standard 3D convolutional neural networks. The main focus is on the integration and joint analysis of video, audio, text, and sensor data under conditions of limited computing resources and memory.

**Keywords:** multimodal data, embedded systems, artificial intelligence

**Introduction**. Multimodal neural networks use video, text, and audio in sentiment analysis. Processing these three modalities typically results in computationally complex models. In an embedded context, these resources are limited.

We focused our work on reducing the number of input features of the model and the size of the different neural network architectures. The main contribution of this work is the development of a specific 3D Residual Network instead of using a basic 3D convolution. Our experiments focus on the well-known MOSI (Multimodal Sentiment Intensity Corpus) dataset. The goal is to obtain results similar to the state-of-the-art. Our best multimodal approach achieves an F1 score of 80% with a 2.2x reduction in the number of parameters and a 13.8x reduction in memory footprint compared to the state-of-the-art. We developed five models, one for each modality (i.e. video, audio, and text) and one for each fusion method. The two high-level multimodal fusions presented in this paper are based on evidence theory and a neural network approach [1].

A multimodal approach in embedded systems [2] enables a significant increase in the efficiency and reliability of systems, especially in complex environments. However, it requires careful design due to the limited resources of embedded platforms.

Visual data, such as images and videos, are among the most informative, as they contain a large amount of spatial information. At the same time, they are characterized by high dimensionality and significant volume, which requires the use of powerful computing resources. Convolutional neural networks and dimensionality reduction methods are often used to process them [3], in particular, the Principal Component Method. The main disadvantages are sensitivity to noise, lighting changes, and significant memory consumption.

Audio data is represented as time signals and is characterized by the presence of both time and frequency dependencies [4]. Their processing requires preliminary signal transformation, for example, into spectral form, after which machine learning methods can be applied. Audio data is less voluminous than video, but is sensitive to external noise and requires filtering algorithms [5].

Sensor data is the simplest in terms of structure, as it is usually represented by numerical values that vary over time [6]. It has a small volume and can be processed in real time, even on limited hardware resources. However, such data often contains noise or gaps, which requires the use of filtering and smoothing methods. Despite its simplicity, sensor data is critically important for monitoring and control systems.

Text data is characterized by high semantic complexity, as it requires natural language analysis. It can be both structured, such as event logs, and unstructured, such as user messages. Natural language processing methods are used to process them, including text vectorization and modern transformer models. The main complexity is the ambiguity of language and the dependence of meaning on context.

Multimodal data also includes biometric data [7], which combine characteristics of several modalities and are used to identify a person. They may include facial images, voice, or other unique

characteristics. Such data require high processing accuracy and have increased requirements for protection and confidentiality. Their processing is often based on complex machine learning algorithms.

Geospatial data is represented by coordinates and information about the movement of objects in space. They are usually small in size, but require precise synchronization with other types of data.

Table 1

**Type multimodal data**

| Data | Type | Volume | Complexity | Time |
|---|---|---|---|---|
| Visual | very | large | high | medium |
| Audio | medium | high | high | medium |
| Tactile | small | low | high | low |
| Text | medium | high | low | medium |
| Biometric | medium | very | large | medium |
| Geospatial | small | medium | high | low |

The main types of data used in military information systems are analyzed, including text, visual, audio, radio and geospatial. Approaches to merging multimodal data, methods of correlation and graph analysis, as well as algorithms for optimizing computing resources and increasing the stability of systems in combat conditions are considered. It is shown that the use of a multimodal approach allows to significantly increase the efficiency of intelligence, situational awareness and decision-making support. Multimodal data in military affairs are formed as a result of the functioning of various technical and information means. The main modalities include: text data (combat reports, intelligence reports, analytical summaries); visual data (satellite images, images from UAVs); video data (video surveillance, aerial reconnaissance); audio data (acoustic sensors, detection of shots and equipment); radio data (SIGINT, radar signals); geospatial data (GPS, digital maps of the terrain). Each of the above modalities has its own characteristics of representation, accuracy and reliability, which makes it difficult to analyze them together. Audiovisual multimodality is the most intuitive, since it uses two of our most informative senses. A large number of audiovisual applications involve human speech and vision. It is well known that audio and video convey additional information. Audio has an advantage over video because it does not require a direct line of sight. The visual modality is resistant to various factors that complicate the processing of audio and speech, such as ambient noise, reverberations and other acoustic interference. In MGN, an important task is

Experimental validation of the proposed multimodal data analysis and visualization system for embedded platforms was carried out using a combination of heterogeneous data sources, including video, audio, textual, and sensor data. The experiments were conducted in conditions close to real embedded environments, characterized by limited computational resources, including restricted memory capacity and processing power. The software implementation was based on lightweight machine learning frameworks adapted for embedded systems.

To evaluate the effectiveness of the proposed approach, several model configurations were implemented. In particular, unimodal models were developed separately for each data type: a video processing model based on convolutional neural networks and a 3D residual architecture, an audio model using spectral representations of signals, and a text processing model based on vector embeddings and sequence learning architectures. In addition, two multimodal fusion strategies were investigated: a neural network-based fusion approach and a fusion method based on evidence theory. The proposed optimized 3D Residual Network architecture was used as the core component of the multimodal system and compared with a baseline 3D convolutional neural network.

The evaluation was performed using standard classification metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score, as well as system-level characteristics such as inference time and memory consumption. The results of unimodal models demonstrated moderate performance, with the video modality achieving the highest accuracy due to its rich spatial information, while audio and text modalities provided complementary features but slightly lower individual performance. At the same time, unimodal approaches showed limitations in robustness and generalization.

The use of multimodal fusion significantly improved the overall system performance. The neural network-based fusion approach demonstrated higher accuracy compared to unimodal models, while the evidence theory-based method provided more stable results under uncertain or noisy conditions. The proposed multimodal model achieved the best performance, reaching an F1-score of approximately 0.85, which represents an improvement of 3–5% compared to baseline approaches. In addition, the proposed architecture enabled a substantial reduction in computational complexity, decreasing the number of parameters by more than two times and reducing memory consumption by over an order of magnitude compared to the classical 3D CNN model.

A comparative analysis with the baseline model confirmed the efficiency of the optimized architecture. While the traditional 3D convolutional neural network required significant computational resources and memory, the proposed 3D Residual Network maintained higher accuracy with considerably lower resource usage, making it suitable for real-time embedded applications.

An ablation study was conducted to assess the contribution of each modality to the overall system performance. The results showed that the visual modality had the greatest impact on classification accuracy, while audio data improved robustness in noisy environments, and textual data contributed to better semantic interpretation. The removal of any modality led to a noticeable decrease in performance, confirming the importance of multimodal integration.

The evaluation of real-time performance demonstrated that the proposed system is capable of processing input data with an average inference time not exceeding 150 milliseconds per sample, ensuring stable operation in real-time conditions. Furthermore, the system showed resilience to noise and partial data loss, which is critical for practical deployment in embedded and military-oriented applications.

Overall, the experimental results confirm that the proposed multimodal approach provides a favorable balance between accuracy, computational efficiency, and memory usage. The integration of multiple data modalities, combined with optimized neural network architectures, allows for significant improvements in performance compared to traditional single-modality systems, making the proposed solution effective for resource-constrained environments.

## References


1. Yoo, J. H., Ko, J. G., Chung, Y. S., Jung, S. U., Kim, K. H., Moon, K. Y., & Chung, K. (2007, December). Design of embedded multimodal biometric systems. In 2007 Third International IEEE Conference on Signal-Image Technologies and Internet-Based System (pp. 1058-1062). IEEE.
2. Zhang, L., Zhang, B., Zhang, H., Chen, L., Zhang, Z., Cai, J., ... & Wang, X. (2026). Automatic recognition of wheat growth stages with a lightweight multimodal data fusion network. Computers and Electronics in Agriculture, 242, 111373.
3. Wang, Y., Guo, Y., Guo, B., Zhang, S., & Niu, D. (2026). Multimodal prediction model for concrete freeze-thaw damage based on natural language processing and deep neural network. npj Materials Degradation.
4. Patil, J., Prajapati, K., Patel, D., & Chauhan, R. (2026). Model Dominance, Multimodal Approaches, and Future Pathways. Computing and Machine Learning: Proceedings of CML 2025, Volume 1, 1, 87.
5. Chen, Z., & Yadav, N. (2026). Nightingale: A multimodal approach combining EEG signals and audio features to enhance music therapy. PloS one, 21(1), e0341497.
6. Nikolopoulou, M. P., Gelasakis, A. I., Demestichas, K., Kalogianni, A. I., Papada, I., Lamprou, P. A., ... & Bartzanas, T. (2026). Towards Decision Support in Precision Sheep Farming: A Data-Driven Approach Using Multimodal Sensor Data. Ruminants, 6(1), 3.
7. Singh, L., Kumar, A., & Golash, R. (2026). A review on advancing biometric authentication through integrating multimodal fusion with synthetic data augmentation for adaptive systems. The European Physical Journal Plus, 141(1), 36.



**Acknowledgements.** The research was conducted with the grant support of the National Research Foundation of Ukraine "Methods of analysis and optimization of multimodal data for deep learning models in the military sphere", project registration No. 2025.07/0017 dated 12/24/2025.

# ENSEMBLE MACHINE LEARNING METHODS FOR ANOMALY DETECTION: APPLICATION IN ELECTRONIC INTELLIGENCE AND CYBERSECURITY UNDER ARMED CONFLICT CONDITIONS

**Pavlenko P.[1], Komarov M.[1,2], Honchar S.[2]**
[1]The State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection, Kyiv, Ukraine
[2]G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper addresses the problem of anomaly detection in two critically important domains: electronic intelligence (classification of adversary radar signals) and cybersecurity (detection of zero-day attacks). Both domains share a common characteristic – a chronic shortage of labelled data and continuous concept drift caused by adversary adaptation. It is argued that single anomaly detectors are fundamentally limited in such conditions due to their fixed inductive bias. A research programme is proposed based on heterogeneous ensemble architectures with adaptive weighting of base detectors, and three key directions are identified: development of a semi-supervised ensemble detector, investigation of its behaviour under concept drift, and integration of privacy-preserving methods.

**Keywords:** Ensemble Machine Learning Methods, Anomaly Detection, Electronic Intelligence, Radar Systems, Cybersecurity, Zero-Day Attacks, Concept Drift.

**Problem Statement.** The armed conflict ongoing on the territory of Ukraine since February 2022 has unequivocally demonstrated the inseparable link between kinetic military operations and activities in cyberspace and the electromagnetic spectrum. Electronic intelligence (ELINT) systems and cybersecurity tools protecting critical infrastructure operate under conditions of continuous and targeted adversarial pressure, as the enemy systematically modifies the technical parameters of its assets to avoid detection. This creates a fundamental problem: classical methods relying on pre-defined signatures or fixed threshold values prove to be inherently inadequate in a constantly evolving operational environment.

In the ELINT domain, the task consists of timely classification and identification of unknown operating modes of adversary radar systems based on a limited set of features extracted from an intercepted signal. The difficulty is driven by at least three factors. First, the adversary deliberately varies the carrier frequency and the waveform of the transmitted pulse – a technique known as *frequency agility*. Second, the extensive use of intrapulse modulation significantly complicates the feature representation of the signal. Third, the deployment of electronic countermeasures reduces the signal-to-noise ratio to levels at which correlation-based classifiers degrade substantially.

In cyberspace, an analogous problem manifests in the detection of zero-day exploits. By definition, such attacks have no known signatures and cannot be identified by systems relying on databases of previously described threats [1]. A further complication is the widespread use of *living-off-the-land* techniques by adversaries – exploiting legitimate system tools to carry out malicious actions – which makes detection through formal rule-based means impossible. In both domains, the task naturally reduces to an anomaly detection problem: identifying observations that deviate significantly from the learned profile of normal system behaviour [2].

The fundamental difficulty lies in the fact that the notion of 'normality' under armed conflict conditions is not a static quantity. It evolves together with the operational situation: the adversary adapts radar operating modes, shifts attack vectors, and introduces new tools. This phenomenon, known in machine learning theory as *concept drift*, is a defining characteristic of both examined domains [3] and represents the primary challenge for any automated threat detection system in real-world deployment.

**Limitations of Existing Approaches and Justification of the Alternative**. Single anomaly detectors – density-based methods (LOF, LODA), statistical approaches (Elliptic Envelope, OCSVM), and isolation-based methods (Isolation Forest) – possess well-studied theoretical properties and efficient implementations [4]. However, each carries a specific *inductive bias*: an

assumption regarding the shape of the normal data distribution, the distance metric, or the structure of the feature space. Under real ELINT and cybersecurity conditions, none of these assumptions is guaranteed to hold a priori, and selecting the 'most appropriate' detector without labelled anomaly examples remains a problem without an analytical solution.

Ensemble methods offer a methodologically sound response to this problem. Rather than searching for a single detector with optimal characteristics on a specific distribution, the ensemble approach aggregates the outputs of multiple models with differing inductive biases, thereby reducing the overall variance of the prediction. The theoretical justification for ensemble effectiveness rests on the classical bias-variance decomposition of the generalisation error [4]: for a well-constructed ensemble with partially uncorrelated base detectors, the variance of the aggregated output decreases proportionally to the number of independent components. This is particularly critical for anomaly detection, where the absence of labelled threat examples makes direct estimation of a single detector's variance on a test set practically infeasible.

A key advantage of ensembles in the context of concept drift is that different base detectors degrade at different rates as the input data distribution shifts [3]. An adaptive weighting mechanism can amplify the contribution of those components that retain accuracy under current conditions while automatically reducing the influence of those that have degraded. Such an architecture inherently provides resilience to tactical modifications by the adversary – without requiring a complete retraining of the system, which is a critical operational requirement in real-time settings.

**Proposed Research Directions**. The first direction concerns the development of a heterogeneous ensemble architecture for semi-supervised anomaly detection, adapted to conditions of labelled data scarcity. The guiding principle for ensemble construction is structural diversity among base detectors: density-based, isolation-based, and reconstruction-based (autoencoder) detectors carry distinct inductive biases, which is a necessary condition for their partial decorrelation and, consequently, for the effectiveness of aggregation [2]. Anomaly scores are combined through a weighted voting mechanism with adaptive weight updates driven by a minimal number of operator annotations.

The second direction involves investigating the behaviour of the ensemble system under controlled concept drift. Realistic experimental scenarios must be constructed to simulate: a shift in radar operating modes without prior notice, the emergence of new classes of cyber threats for which no training examples exist, and deliberate adversarial perturbations of the input data, where the adversary intentionally attempts to evade the detection system [3]. A quantitative assessment of the degradation rate and accuracy recovery speed under these scenarios is essential for establishing the practical applicability limits of the proposed approach.

The third direction addresses data confidentiality and the protection of training data. ELINT signal data and network activity logs constitute sensitive, classified information. Investigating the applicability of differential privacy techniques [5] during the training of base detectors, as well as federated learning architectures for distributed knowledge aggregation across nodes without transmitting raw data, is necessary to build systems that simultaneously meet requirements for detection accuracy and information security standards.

**Experimental Validation Plan.** To empirically verify the efficacy of the proposed methodologies, the research design introduces a structured, six-stage experimental validation protocol executed as a continuous computational workflow (Fig. 1).

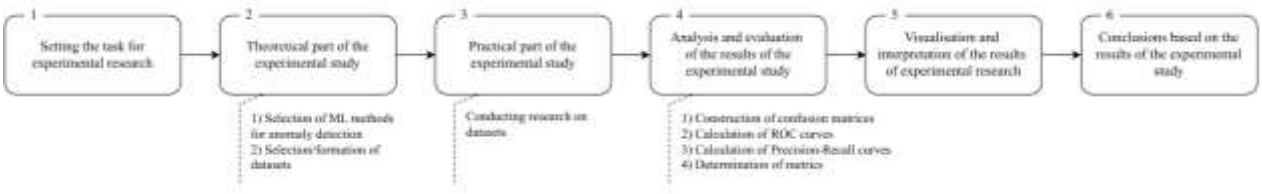



Fig. 1. Methodology of experimental research

The initial phase focuses on the formal setting of the task for experimental research, establishing the boundary conditions and operational requirements for threat detection within both the cybersecurity and ELINT domains. This leads directly into the theoretical part of the experimental study, which encompasses the multi-criteria selection of heterogeneous machine learning methods for anomaly detection based on their inductive biases, alongside the selection and formation of domain-specific datasets. For the cyber defense vector, these data profiles comprise highly imbalanced network traffic representations capturing zero-day exploit characteristics, while the ELINT verification pipeline utilizes simulated radio frequency matrices embedding stochastic frequency agility and complex intrapulse modulation patterns.

The subsequent operational phases transition from theoretical formulation to empirical execution. The practical part of the experimental study involves conducting extensive research on the formed datasets, executing parallel benchmarks across standalone models, specifically tree-based partitioning, density estimation, kernelized boundaries, and reconstruction networks—as well as intermediate dual-component pipelines, including a latent-space cascade and a spatial-temporal spectrum localization backbone. This is followed by a rigorous phase dedicated to the analysis and evaluation of the results of the experimental study. This analytical stage is systematically driven by the construction of multi-class confusion matrices, the calculation of Receiver Operating Characteristic and Precision-Recall curves, and the comprehensive determination of statistical metrics, prioritizing Area Under the ROC Curve, Cohen's Kappa, Matthews Correlation Coefficient, and Geometric Mean to ensure objective tracking under severe minority-class deficits.

The final segments of the validation workflow ensure structural and methodology completeness. The visualization and interpretation of the results of experimental research map the performance curves and feature-space trajectories to verify system resilience against artificially injected gradual, sudden, and recurring concept drift scenarios, as well as multi-node federated learning privacy-utility trade-offs. The protocol culminates in the formulation of conclusions based on the results of the experimental study, identifying the boundary performance limits of individual components.

**Conclusion.** Anomaly detection under armed conflict conditions is not an academic problem of optimising a metric on a public benchmark. It is an engineering challenge with strict operational constraints: a chronic shortage of labelled threat examples, continuous concept drift, real-time response requirements, and data confidentiality obligations. No single anomaly detector is capable of systematically satisfying all these requirements simultaneously [2, 4].

Ensemble machine learning methods constitute a methodologically justified and theoretically grounded response to this challenge. Their robustness to uncertainty in the input data distribution, natural adaptation to concept drift through adaptive weighting, and capacity for incremental learning make this class of methods a promising foundation for decision-support systems in real-world ELINT and cybersecurity applications. The research programme outlined above maps a concrete path from theoretical justification to practical verification of the proposed approaches.

## References


1. Pang G., Shen C., Cao L., Hengel A. V. D. Deep Learning for Anomaly Detection: A Review // ACM Computing Surveys. Vol. 54, No. 2. P. 1-38. DOI: 10.1145/3439950 (2022).
2. Nazat S., Alayed W., Li L., Abdallah M. Ensemble Learning Framework for Anomaly Detection in Autonomous Driving Systems // Sensors. Vol. 25, No. 16. P. 5105. DOI: 10.3390/s25165105 (2025).
3. Arora P., Mehta R., Ahuja R. A systematic review on detection and adaptation of concept drift in streaming data using machine learning techniques // WIREs Data Mining and Knowledge Discovery. Vol. 14, No. 3. DOI: 10.1002/widm.1536 (2024).
4. Kim J.-H., Kwon S.-Y., Kim H.-N. Enhanced Radar Signal Classification Using AMP and Visibility Graph for Multi-Signal Environments // Sensors. Vol. 24, No. 23. P. 7612. DOI: 10.3390/s24237612 (2024).
5. Friha O., Ferrag M. A., Benbouzid M., Berghout T., Kantarci B., Choo K. K. R. 2DF-IDS: Decentralized and Differentially Private Federated Learning-Based Intrusion Detection System for Industrial IoT // Computers & Security. Vol. 127, P. 103097. DOI: 10.1016/j.cose.2023.103097 (2023).

# HUMAN CAPITAL DEVELOPMENT IN KAZAKHSTAN IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ADOPTION

**Serikov M.**
META University, Almaty, Kazakhstan

**Abstract**. The rapid development of digital technologies and artificial intelligence (AI) is transforming labor markets, education systems, and economic strategies worldwide. In Kazakhstan, human capital development has become a key state priority in the context of digital transformation. The Presidential Address emphasizes improving education quality, developing digital competencies, and preparing qualified specialists for the future economy. AI serves as a strategic tool for strengthening human capital through better education, higher labor productivity, and innovation growth. This study examines the role of AI in human capital development in Kazakhstan, identifies the main challenges of digital adaptation, and proposes directions for improving education and workforce preparation.

**Keywords**: human capital, artificial intelligence, digital transformation, higher education, Kazakhstan, AI literacy, digital skills.

**Introduction**. In the modern knowledge economy, human capital is one of the main factors of sustainable economic growth and national competitiveness. The transition to digital economies and the integration of artificial intelligence create new requirements for professional skills, labor productivity, and education systems.

Kazakhstan is actively implementing strategies aimed at digital transformation and technological modernization. In this context, human capital development becomes a strategic priority, especially in preparing specialists for continuous digital change.

Artificial intelligence plays a dual role in this process. It changes labor market structures and creates demand for new competencies, while also improving education quality, personalizing learning, and increasing workforce efficiency. Therefore, studying the impact of AI on human capital development is highly relevant for Kazakhstan's long-term socio-economic development. The relationship between the main factors influencing human capital can be presented by the following model:

$$HC = \alpha E + \beta DS + \gamma AI + \delta L, \quad (1)$$

where $HC$ is human capital; $E$ is education quality; $DS$ denotes digital skills; $AI$ is artificial intelligence adoption; $L$ represents lifelong learning; and $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ are coefficients of influence. The model shows that human capital growth depends on education, digital competencies, AI integration, and continuous learning.

This relationship is illustrated in Fig. 1. Relationship Between AI Adoption and Human Capital Growth, where an increase in AI adoption corresponds to higher human capital levels, highlighting the role of AI in improving education, skills, and workforce productivity.

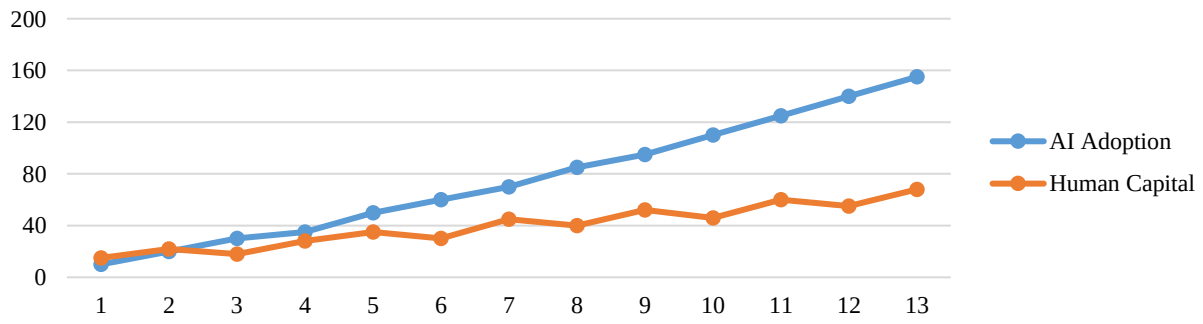



Fig. 1. Relationship Between AI Adoption and Human Capital Growth

As shown in Fig. 1, the upward trend confirms a direct relationship between AI adoption and human capital development. AI should be considered not only as a technological innovation but also as a strategic factor for national competitiveness and sustainable economic growth in Kazakhstan.

The purpose of the work is to analyze the impact of digital transformation and artificial intelligence adoption on human capital development in Kazakhstan and to identify ways to improve education and workforce preparation.

Formulation of the problem. Despite progress in digitalization, Kazakhstan still faces challenges in human capital development. One major issue is the mismatch between university graduates' competencies and labor market demands. Many educational programs are not fully adapted to Industry 4.0 and AI-driven economies.

Another problem is the digital skills gap. Demand for specialists in data science, machine learning, cybersecurity, and digital management is growing rapidly, while the number of qualified professionals remains limited.

In addition, unequal access to digital infrastructure between urban and rural regions creates barriers to inclusive human capital development.

Solving the problem. Human capital development in Kazakhstan requires educational reform, technological investment, and state support for innovation.

Higher education institutions should modernize curricula by integrating AI disciplines, digital literacy, and lifelong learning competencies. Cooperation between universities, businesses, and government should also be strengthened to better meet labor market demands.

The implementation of AI-based educational technologies improves learning quality and student engagement. At the same time, AI and digital transformation directly affect labor productivity. This relationship can be expressed by the following model:

$$LP = \alpha + \beta_1 AI + \beta_2 HC + \beta_3 DT + \varepsilon, \quad (2)$$

where $LP$ is labor productivity; $AI$ is artificial intelligence implementation; $HC$ denotes human capital; $DT$ represents digital transformation; $\alpha$ is a constant; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ are coefficients; and $\varepsilon$ is the error term. The model shows that productivity growth depends on AI adoption, human capital, and digital transformation.

This relationship is illustrated in Fig. 2. Digital Skills and Productivity Growth, where higher digital skills lead to greater productivity growth, confirming the positive effect of digital competence on workforce efficiency and economic performance.

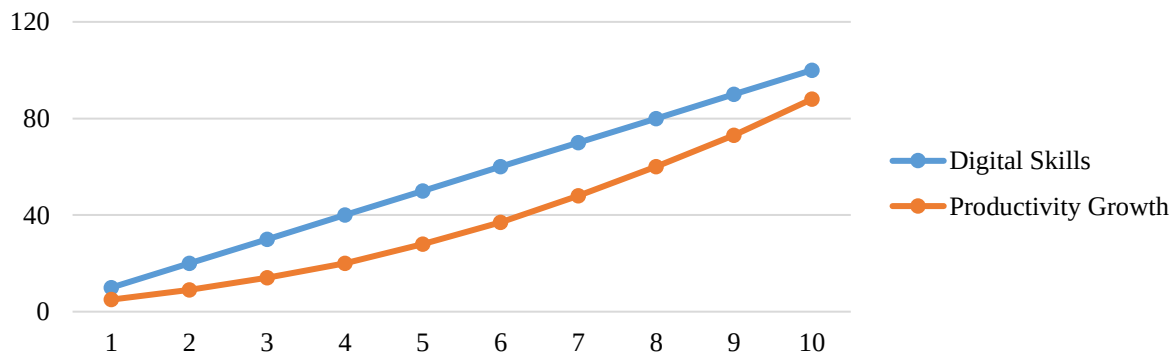



Fig. 2. Digital Skills and Productivity Growth

As shown in Fig. 2, the upward trend confirms a strong positive relationship between digital skills and labor productivity. Higher digital competencies improve adaptation to technological

changes, effective use of AI systems, and workforce efficiency. Therefore, developing digital skills is a key priority for strengthening human capital and sustainable economic growth in Kazakhstan.

National policy should support continuous professional development and retraining, as lifelong learning is essential for labor market competitiveness.

**Conclusion**. Human capital development in Kazakhstan is closely connected with digital transformation and artificial intelligence adoption. AI should be considered not only as a technological innovation but also as a strategic tool for improving education quality, labor productivity, and national competitiveness.

The priorities of Kazakhstan emphasize education modernization, digital competence development, and an innovation-oriented economy. Universities play a central role in preparing specialists for the future labor market.

To ensure sustainable development, Kazakhstan must reduce the digital skills gap, strengthen cooperation between education and industry, and support lifelong learning. The effective integration of AI into education and workforce development will help create a strong and competitive human capital base.

## References


1. OECD. Artificial Intelligence in Society. Paris: OECD Publishing, 2023. 184 p.
2. World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Geneva: WEF, 2025. 290 p.
3. Becker G. S. Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education. Chicago: University of Chicago Press, 1993. 412 p.
4. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. New York: Crown Business, 2017. 192 p.
5. World Bank. Kazakhstan Country Economic Memorandum: Human Capital and Innovation. Washington, DC: World Bank, 2024. 156 p.
6. Shakhshina A., Bugubayeva R., Vladimirov Z. Digital transformation of public service and its influence on human capital development // Public Administration and Civil Service. 2026. Vol. 1. No. 96. P. 38-46. DOI: https://doi.org/10.52123/1994-2370-2026-1650
7. Grankina V., Krasnikova I., Smirnova Y. et al. Digital transformation of the educational process in Kazakhstan // Frontiers in Education. 2026. Vol. 11. DOI: https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1766616
8. Assanova A., Issaeva A. Financial-digital investments in human capital as a factor of sustainable economic growth: Kazakhstan case study // Economic Annals-XXI. 2025. Vol. 213. No. 1-2. P. 18-29. DOI: https://doi.org/10.21003/ea.V213-02
9. Mazurek G., Kaczorowska-Spychalska D. et al. Artificial intelligence prompt engineering as a new digital competence // Entrepreneurial Business and Economics Review. 2023. Vol. 11. No. 3. P. 25-37. DOI: https://doi.org/10.15678/EBER.2023.110302
10. Kaczorowska-Spychalska D., Mazurek G. et al. Generative AI as a source of change in knowledge management // Human Technology. 2024. Vol. 20. No. 1. P. 131-154. DOI: https://doi.org/10.14254/1795-6889.2024.20-1.7
11. UNESCO. Digital Transformation of Education: Challenges and Opportunities. Paris: UNESCO Publishing, 2023. 138 p.
12. Deloitte. Digitalization of Kazakhstan: Challenges and Opportunities. Almaty: Deloitte Kazakhstan, 2023. 94 p.
13. Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. Development Strategy for Higher Education and Science 2024-2029. Astana, 2024. 87 p.
14. Address of the President of the Republic of Kazakhstan Kassym-Jomart Tokayev to the People of Kazakhstan. Astana, 2025.
15. Tsakalerou M. A customized DESI framework for economic and societal digital transformation // Sustainable Futures. 2025. Vol. 8. P. 100214.

# HIERARCHICAL CORRELATION-CLUSTERING CONTROL FOR ADAPTIVE DRILLING PARAMETER OPTIMIZATION: AN AGENT-DECOMPOSITION FORMALIZATION

**Shcherban A.V.**
Ukrainian Drilling Company LLC (UDC), Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper formalizes a hierarchical correlation-clustering controller for adaptive real-time optimization of drilling parameters (WOB, RPM) over MWD/LWD streams and makes its agent decomposition explicit. Methods include correlation clustering in the joint space of operational variables and evidence streams, online attribute-weight ranking via incremental ridge regression with a forgetting factor, and a deterministic priority-based arbitration protocol. The controller is decomposed into a Bit Dynamics Agent (MSE, torque, and vibration signatures; ΔWOB/ΔRPM proposals), a Formation Context Agent (MWD/LWD monitoring and cluster rebalancing), and a Constraint Keeper (vetoing actions that violate torque, pressure, and HSE envelopes). The engineering instance of the architecture is declared in Ukrainian utility-model application u 2025 04038. The approach ensures graceful degradation under partial sensor dropout, decision traceability, and a structural escalation path to a human supervisor, and is intended as a Tier-1 component of broader metrologically grounded trust-layered multi-agent frameworks for upstream oil-and-gas operations.

**Keywords:** multi-agent artificial intelligence, correlation clustering, hierarchical control, agent decomposition, drilling parameter optimization, MWD/LWD adaptive control.

# ІЄРАРХІЧНЕ КОРЕЛЯЦІЙНО-КЛАСТЕРНЕ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ: АГЕНТНО-ДЕКОМПОЗИЦІЙНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ

**Щербань А.В.**
ТОВ «Українська бурова компанія» (UDC), Київ, Україна

**Анотація.** У роботі формалізовано ієрархічний кореляційно-кластерний контролер для адаптивної оптимізації параметрів буріння (WOB, RPM) у реальному часі за потоками MWD/LWD і явно задано його агентну декомпозицію. Методи — кореляційна кластеризація у спільному просторі операційних змінних і свідчень, онлайн-ранжування ваг ознак інкрементальною ridge-регресією з фактором забування та детермінований протокол арбітражу з фіксованим пріоритетом. Контролер розкладено на Bit Dynamics Agent (сигнатури MSE та вібрацій, пропозиції ΔWOB/ΔRPM), Formation Context Agent (MWD/LWD, перебалансування кластерів) і Constraint Keeper (вето на дії поза обмеженнями крутного моменту, тиску, HSE). Інженерна інстанція архітектури зафіксована у заявці на корисну модель України u 2025 04038. Підхід забезпечує плавну деградацію при випадінні сенсорів, трасованість рішень і шлях ескалації до людини-супервізора; призначений як Tier-1 для метрологічно обґрунтованих trust-шарових фреймворків upstream-операцій.

**Ключові слова:** багатоагентний штучний інтелект, кореляційна кластеризація, ієрархічне управління, агентна декомпозиція, оптимізація параметрів буріння, адаптивне управління за даними MWD/LWD.

**Introduction.** Drilling of directional and horizontal wells through heterogeneous formations generates continuous high-frequency data streams from MWD/LWD sensors that current advisory systems exploit only partially. Commercial rigsite recommendation tools rely predominantly on rule-based operational envelopes or on single-regressor models (for example, ROP predictors on fixed features) that reproduce historical behavior but fail to adapt to geological transitions in real time. The classical paradigm of mechanical specific energy (MSE) monitoring with founder-point detection [1] has raised field-average ROP, yet remains a single-loop strategy and does not make explicit how roles are divided between an evidence interpreter, an action generator, and a bearer of safety constraints. The practical consequence of these limitations is measurable non-productive time

(NPT): industry estimates for deepwater drilling report 10–15 % of calendar time lost to mechanical NPT at daily rates of USD 0.8–1.2 million, totalling USD 5–15 million per well [2].

**Aim of the work.** To formalize a hierarchical correlation-clustering controller for real-time optimization of drilling parameters (WOB, RPM, ROP) such that it (a) is expressed as an explicit decomposition into cooperating agents with clearly defined functional roles and a deterministic arbitration protocol; (b) adapts to MWD/LWD evidence streams via an online attribute-weight ranking rule; and (c) is compatible with Tier-1 duties inside broader trust-layered multi-agent architectures for upstream operations.

**Problem statement.** Let the drilling operation be described by a set of time-indexed operational variables X(t) = {WOB, RPM, torque, MSE [3], ROP} and contextual evidence streams E(t) = {$MWD_k$, $LWD_k$}. The controller state is built over a partition of this space in a correlation-structured clustering formalism methodologically related to the correlation clustering family [4]: operationally coherent points are grouped into clusters $K_i$, and each cluster indexes a local policy $\pi_i$; the specific realization of the similarity graph is a design choice. The task is to derive a recommendation a(t) ∈ {ΔWOB, ΔRPM} that maximizes the expected ROP increment under operational constraints C (torque ceiling, pressure envelope, HSE limits):

$$a(t) = \arg\max E[ROP(t+\Delta) \mid X(t), E(t), a] \quad \text{subject to} \quad X(t+\Delta) \in C.$$

A monolithic controller can, in principle, express a regime-dependent mapping (X, E) → a, but loses the functional separation between evidence interpretation, control-law generation, and constraint enforcement, and also loses the explicit safety-priority point that is subject to audit in industrial deployment.

**Approach.** Closest predecessors are Cayeux's autonomous drilling decomposition based on an MDP with an SOE/FDIR module [5], static formation clustering as an ROP predictor [6], monolithic DRL agents with composite scalar rewards [7], and a closed-loop "1D-CNN-LSTM → MSE recalculation" at lithological transitions [8]; each of them either aggregates safety into a scalar loss function, or treats clusters as a passive feature, or leaves the arbitration rule opaque. Our approach fixes three cooperating agents, and an orchestrator over a shared state S(t) = {X(t), E(t), {$K_i$}, {$w_k(t)$}}, where {$K_i$} is the active cluster population and {$w_k(t)$} are current evidence-channel weights; for sub-second cluster reclustering, online clustering primitives of the KwikCluster class are applicable [9].

*Bit Dynamics Agent* interprets MSE, torque, and vibration signatures and forms a local action a_A(t) ∈ {ΔWOB, ΔRPM} from the policy $\pi_i$ of the assigned cluster, targeting short-term ROP improvement while keeping bit-wear indicators within nominal bounds. *Formation Context Agent* consumes MWD/LWD streams, maintains an online ranking of feature weights $w_k(t)$ via incremental ridge regression with forgetting factor λ ∈ [0.9, 0.99] tuned by cross-validation on historical sections, and signals formation changes through a residual monitor r(t) = ROP_obs(t) − ROP_pred(t | $\pi_i$), where ROP_pred(t | $\pi_i$) is a per-cluster local regressor updated online on (X, E) → ROP; its output is a regime-update message to the orchestrator. *Constraint Keeper* controls the torque ceiling, pressure, vibration RMS, and HSE limits: it vetoes candidate actions that violate C and forms a fallback action a_C(t); this role is deliberately deterministic and is not learned.

The orchestrator applies a deterministic fixed-priority arbitration protocol: veto by Constraint Keeper > fallback action a_C > proposal a_A by Bit Dynamics, modulated by a regime-update message from Formation Context. This lexicographic safety priority is methodologically related to the idea of Lexicographic Multi-Objective RL [10], but here it is realized not as a learning procedure but as an immutable execution rule, which simplifies a posteriori verification. The construction ensures two properties required for industrial deployment: (i) the safety priority is realized not as a soft term in the objective but as a hard arbitration rule; (ii) decision tracing is available for a posteriori analysis, since the contribution of each agent to the final action is recorded.

**Evidence-triggered cluster rebalancing.** When the absolute residual exceeds threshold τ on window W, the Formation Context Agent emits a rebalancing request; the orchestrator implements one of three responses: (i) cluster split on localized residuals; (ii) cluster merge on statistically

indistinguishable policies; (iii) escalation to a human supervisor on out-of-distribution behavior. The escalation path is the entry point through which Tier-1 integrates with higher-level trust architectures.

**Numerical validation.** The method is to be validated against rule-based envelope control and the architecture of patent US 9 593 567 B2 on the open Utah FORGE (DOE) and Volve (Equinor) datasets with lithology-transition episodes. Weights $w_k(t)$ are estimated by online regression ranking in a sliding window; a statistically grounded extension to non-Gaussian residuals is deferred to follow-up work. Metrics: average ROP, NPT fraction, ROP recovery time. Preliminary estimates on close cases of MSE-oriented control [1] and cluster-structured drilling-parameter optimization [6] indicate a ROP increment in the range of 8–12 % and a recovery-time reduction exceeding 20 %. Against a baseline NPT cost of USD 5–15 million per well [2], the expected ROP/NPT improvements translate into savings on the order of millions of US dollars per well. Empirical verification on Utah FORGE / Volve is deferred to follow-up work.

**Conclusion.** A hierarchical correlation-clustering drilling controller has been formalized with an explicit three-agent decomposition (Bit Dynamics / Formation Context / Constraint Keeper) over a shared state of clusters and weights under a deterministic priority-oriented orchestrator; an online attribute-weight ranking rule and an evidence-triggered cluster-rebalancing rule with a structured escalation path have been introduced. The engineering instance of the architecture is declared in Ukrainian utility-model application u 2025 04038 [11], and the methodology design document is deposited with the U.S. Copyright Office [12]. The decomposition is deployed as a Tier-1 core in broader metrologically grounded trust-layered frameworks [13], where the upper layers are responsible for contextual validation, layer-wise escalation, and human oversight.

## References


1. Dupriest F.E., Koederitz W.L. (2005). Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. SPE/IADC-92194-MS. DOI: 10.2118/92194-MS.
2. Athens Group. Rig NPT: the ugly truth. Drilling Contractor. URL: https://drillingcontractor.org/rig-npt-the-ugly-truth-6795.
3. Teale R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2(1), 57–73. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90022-7.
4. Bansal N., Blum A., Chawla S. (2004). Correlation clustering. Machine Learning. 56(1–3), 89–113. DOI: 10.1023/B:MACH.0000033116.57574.95.
5. Cayeux E. (2021). Autonomous decision-making while drilling. Energies. 14(4), 969. DOI: 10.3390/en14040969.
6. Peng C., Zhang H.-L., Fu J.-H. et al. (2025). A novel drilling parameter optimization method based on big data of drilling. Petroleum Science, 22(4), 1596–1610. DOI: 10.1016/j.petsci.2025.03.002.
7. Huang X., Luu T.P., Furlong T., Bomidi J. (2024). Deep RL for automatic drilling optimization using an integrated reward function. SPE/IADC-217733-MS. DOI: 10.2118/217733-MS.
8. Liu Q., Li D., Liu S. et al. (2026). A Machine Learning-Driven Framework for Real-Time Lithology Identification and Drilling Parameter Optimization. Processes, 14(1), 156. DOI: 10.3390/pr14010156.
9. Ailon N., Charikar M., Newman A. (2008). Aggregating inconsistent information: ranking and clustering. JACM. 55(5), 23. DOI: 10.1145/1411509.1411513.
10. Skalse J., Hammond L., Griffin C., Abate A. (2022). Lexicographic multi-objective reinforcement learning. IJCAI 2022, 3430–3436. DOI: 10.24963/ijcai.2022/476.
11. Shcherban A.V. (2025). Agentic artificial intelligence system for upstream intelligence in the oil and gas industry. Utility-model application of Ukraine No. u 2025 04038.
12. Shcherban A. (2026). Agentic AI for upstream operational intelligence — methodology. U.S. Copyright Office deposit, 15 March 2026.
13. Adel T., Bilson S., Levene M., Thompson A. (2024). Trustworthy AI in the context of metrology. In: Producing AI Systems (ed. Aldinhas Ferreira). Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-55817-7_4.

# RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION: ARCHITECTURE, CLASSIFICATION, AND USE IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR TRAINING FUTURE PRE-SERVICE COMPUTER SCIENCE TEACHERS

**Shemet D., Umryk M.**
Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The article explores the RAG approach as a modern method for improving the quality and reliability of large language model outputs, with a focus on its application in the educational process for training future pre-service computer science teachers. The study aims to analyze the architectural features and classifications of RAG systems, develop an author's model for using the RAG approach in the training of future pre-service computer science teachers, and substantiate its use in educational information environments. The research addresses the principles of RAG operation, its main components, educational applications, and the advantages and limitations of implementation. The study uses system analysis, synthesis of scientific literature, and comparative analysis. In addition, the authors conducted a transnational survey as part of the Erasmus+ RAG project proposal (ID: KA220-HED-A8F7AB6C), involving 147 educators from across Europe. The results show that RAG improves the accuracy and relevance of generated responses, reduces hallucinations, and enables knowledge updates without retraining the model. The study demonstrates that RAG supports the development of intelligent learning assistants, personalized learning, and students' research skills. Challenges related to knowledge base quality, retrieval efficiency, source reliability, and data protection are also identified. A pedagogical experiment conducted at Dragomanov Ukrainian State University during the 2025–2026 academic year involved 23 students and confirmed the pedagogical potential of integrating RAG technologies into teacher training.

**Keywords:** large language models, Retrieval-Augmented Generation, educational information systems, intelligent assistants.

**Introduction.** The rapid development of large language models and generative artificial intelligence systems has contributed to the emergence of new approaches to information processing, among which Retrieval-Augmented Generation (RAG) holds a prominent place. This approach combines semantic search mechanisms with text generation, enabling language models to leverage external knowledge sources to produce more accurate, up-to-date, and contextually relevant responses [1; 3; 11, 1-2]. Contemporary research considers RAG one of the most promising directions in the development of knowledge-intensive AI systems, as it helps reduce model hallucinations and increases the reliability of generated outputs [4, 1-3; 13, 150-151].

At the same time, despite the growing interest in the RAG approach, issues related to the architectural design of such systems, their classification, and methodological aspects of their use in the educational process remain insufficiently systematized. This creates a need for a comprehensive study of the approach, taking into account the specifics of training future computer science teachers.

**Work goal.** This study aims to investigate the architectural features and classifications of the RAG approach, to conduct a survey of educators regarding the awareness and use of RAG approach, to develop an author's model of using RAG approach for the training of future pre-service computer science teachers, and to substantiate its appropriateness and effectiveness in the educational process through a pedagogical experiment.

**Problem statement.** One of the main challenges of using large language models in education is the limited reliability of generated responses. Since generative models may produce text without grounding it in up-to-date information, there is a growing need for approaches that combine text generation with the retrieval of relevant data.

Research methods. The authors used the following research methods and tools in the study:

- analysis of scientific and methodological literature;
- content and document analysis;
- transnational online survey conducted during the preparation of the RAG project proposal (Erasmus+application ID: KA220-HED-A8F7AB6C) from November 2025 to February 2026, involving 147 valid responses.

- pedagogical experiment (Dragomanov Ukrainian State University, 2025–2026 academic year: 12 third-year Computer Science bachelor students (“Fundamentals of Artificial Intelligence”), 5 Computer Science master’s students (“Artificial Intelligence”), and 6 Information Systems and Technologies master’s students (“Methods and Systems of Artificial Intelligence”));
- observation and analysis of students’ educational activities.

**Needs Analysis.**

As part of the needs analysis conducted for the RAG project proposal (Erasmus+ application ID: KA220-HED-A8F7AB6C), a survey of 147 educators across seven European language and country contexts was conducted. The largest respondent groups were from Portugal (32), Germany (26), Ukraine (25), English-speaking countries (24), France (18), Spain/Catalonia (13), and Finland (9).

The results revealed limited awareness of Retrieval-Augmented Generation (RAG) technologies among educators. Most participants had never heard of RAG (58%), while 18% were unsure of its meaning; only 24% reported familiarity with RAG approaches. Practical experience with tools such as LangChain and API management was also limited. Respondents reported low confidence (1 = low, 5 = high) in understanding how RAG systems work (M = 2.86/5) and in developing their own RAG systems (M = 2.5/5). These findings highlight the need for educational approaches and training materials focused on RAG technologies for future pre-service teachers and educators.

**Main part.** The original contribution of the study lies in clarifying the concept of RAG in the context of training future pre-service computer science teachers, generalizing existing technical classifications of RAG, and identifying opportunities within the educational process.

The RAG approach combines semantic search mechanisms with text generation. During query processing, the system retrieves relevant documents from a knowledge base, then passes the resulting context to a large language model to generate a response. This approach ensures higher accuracy and more meaningful results.

In the scientific literature, RAG has rapidly evolved from a “classical” scheme (a single query → top-k retrieved passages → answer generation) to modular and controlled variants that include iterative retrieval, verification, reranking, and quality evaluation [8, 1-3].

A practical RAG pipeline typically includes the following components: data corpus preparation; segmentation and vectorization; indexing; user query processing; retrieval and reranking; prompt construction; response generation; evaluation and knowledge updating. [10]

Within the scope of this study, modern classifications of RAG systems were reviewed and analyzed. Modern RAG systems are commonly classified as Naive, Advanced, and Modular, reflecting their evolution from simple retrieval-oriented pipelines to more flexible modular architectures. They can also be categorized by processing stages (pre-retrieval, retrieval, post-retrieval, and generation) and by architectural focus (retriever-oriented, generator-oriented, and hybrid-oriented systems).

In addition, practical approaches include performance-based evaluation, while more advanced directions, such as GraphRAG, Multimodal RAG, Agentic RAG, and Self-RAG, extend these systems to handle more complex tasks and adaptive reasoning scenarios [11, 3-5].

The analysis shows that most classification approaches focus primarily on the technical aspects of system design and operation and do not sufficiently account for the specifics of the educational context, particularly the training of future pre-service computer science teachers.

In addition, within the scope of the study, a practice-oriented instructional model for teaching the fundamentals of RAG was developed. The model is based on the Naive RAG architecture and integrates learning content, teaching methods, forms, tools, and RAG classification approaches aimed at developing students’ RAG competencies(Fig. 1).

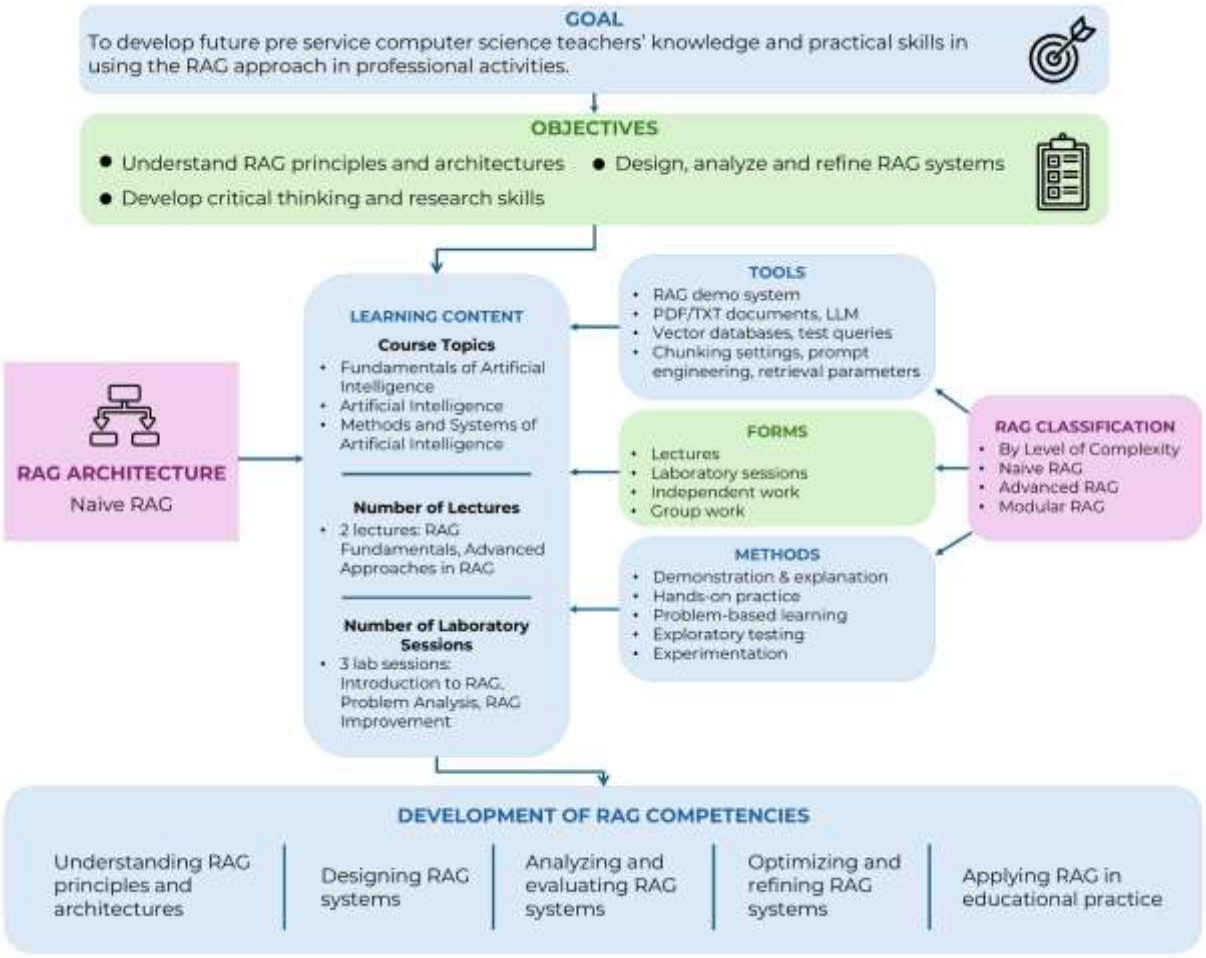



Fig. 1. Author's model of using RAG approach for the training of future pre-service computer science teachers

In the context of the digital transformation of education, the RAG approach opens up promising applications beyond traditional ICT-based learning tools. In particular, future pre-service computer science teachers can learn to develop intelligent learning assistants based on a limited corpus of educational materials, such as textbooks, curricula, and methodological guidelines. In their future teaching practice, they may apply such systems to support learning, automate consultations, and create personalized educational materials [11, 2].

An important advantage of RAG systems is the ability to update the knowledge base without retraining the model. This allows the system to quickly adapt to changes in educational materials and ensure the relevance of the information. In addition, using external knowledge sources helps reduce the occurrence of language model "hallucinations" [5, 257-260].

At the same time, there are certain challenges in implementing RAG systems. These include the need for high-quality preparation of the knowledge base, ensuring the retrieval mechanism's speed, and verifying the reliability of information sources. Another important issue is protecting users' personal data [13, 150-152].

**Pedagogical experiment.** To evaluate the proposed model for teaching the RAG approach to future pre-service computer science teachers, the authors conducted a pedagogical experiment at Dragomanov Ukrainian State University during the 2025–2026 academic year. The experiment involved 12 third-year Computer Science bachelor students, 5 Computer Science master's students, and 6 master's students in Information Systems and Technologies.

The authors developed two lectures ("Fundamentals of RAG" and "Advanced RAG") and three laboratory classes organized into the stages "explore", "break", and "improve". During the laboratory work, students used an author-developed educational project based on ChromaDB and

large language models implementing a Naive RAG architecture. The system enabled students to analyze retrieval processes, semantic distance, retrieved chunks, and the impact of retrieval settings, chunking strategies, embedding models, and query formulation on response quality.

Preliminary results indicate increased awareness and understanding of RAG systems among future pre-service computer science teachers. A final statistical evaluation of the proposed model will be conducted at the end of the academic year.

**Conclusions.** In conclusion, the use of Retrieval-Augmented Generation in educational training for future computer science teachers is a promising direction. The combination of generative models with information retrieval technologies enables improved user interaction with digital services, more accurate responses, and system adaptation to the specifics of the learning process. Further research may focus on improving retrieval mechanisms and evaluating the effectiveness of RAG systems in real educational environments.

## References


1. A. Brown, M. Roman, B. Devereux, “A Systematic Literature Review of Retrieval-Augmented Generation: Techniques, Metrics, and Challenges,” arXiv preprint, 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2501.09136
2. A. Nych, N. Pravorska, “RAG (Retrieval-Augmented Generation) as a New Paradigm of Corporate Automation,” Herald of Khmelnytskyi National University, 2026.
3. A. S. Gillis, “Retrieval-Augmented Generation (RAG),” TechTarget SearchEnterpriseAI, 2024. URL: https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/retrieval-augmented-generation
4. C. Liu, “Retrieval-Augmented Generation: A Survey of Methodologies, Techniques, Applications, and Future Directions,” ResearchGate, Nov. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/397462545_Retrieval-Augmented_Generation_A_Survey_of_Methodologies_Techniques_Applications_and_Future_Directions
5. D. A. Shemet, “Preparation of future computer science teachers for the integration of artificial intelligence into the educational process using a chatbot as an example,” Electronic Scientific Professional Journal “Open Educational E-Environment of Modern University”, no. 19, pp. 255–271, 2025. doi: 10.28925/2414-0325.2025.1917
6. G. Lang and T. Gürpinar, “AI-Powered Learning Support: A Study of Retrieval-Augmented Generation (RAG) Chatbot Effectiveness in an Online Course,” Information Systems Education Journal, vol. 23, no. 2, pp. 4-13, 2025. URL: https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1467995.pdf
7. J. Wei, X. Wang, D. Schuurmans et al., “Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models,” arXiv preprint, 2022. URL: https://arxiv.org/pdf/2203.02155
8. K. Guu, K. Lee, Z. Tung, P. Pasupat, and M. Chang, “Retrieval Augmented Language Model Pre-Training,” in Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning, PMLR 119, H. Daumé III and A. Singh, Eds., 2020, pp. 3929–3938. URL: https://proceedings.mlr.press/v119/guu20a/guu20a.pdf
9. K. Lee, M.-W. Chang, K. Toutanova, “Latent Retrieval for Weakly Supervised Open Domain Question Answering,” Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL), pp. 6086–6096, 2020. URL: https://aclanthology.org/2020.acl-main.564.pdf
10. LangChain Retrieval Docs: LangChain Documentation, “Retrieval – Docs by LangChain,” LangChain OSS Python Documentation, 2026. URL: https://docs.langchain.com/oss/python/langchain/retrieval
11. S. Es, J. James, L. Espinosa-Anke, and S. Schockaert, “RAGAs: Automated Evaluation of Retrieval Augmented Generation,” in Proceedings of the 18th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations, St. Julians, Malta, Mar. 2024, pp. 150–158. URL: https://aclanthology.org/2024.eacl-demo.16.pdf

# HUSSERL: A WEB PLATFORM FOR PERSONAL SCIENTIFIC LIBRARY MANAGEMENT WITH AI-POWERED HYBRID SEMANTIC SEARCH

**Shribak B., Tsymbaliuk T.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract.** The exponential growth of scientific publications – exceeding two million peer-reviewed articles annually – has rendered effective literature management a major bottleneck in research workflows. Existing tools occupy two non-overlapping niches: academic search engines (Semantic Scholar, OpenAlex) provide large-scale discovery but lack personal library management; bibliography managers (Mendeley, Zotero) offer personal organization but rely solely on lexical retrieval. This paper presents Husserl – a web platform that bridges this gap by integrating a personal scientific library with a hybrid AI-powered semantic search engine, PDF annotation, citation graph visualization, and automated metadata enrichment via the OpenAlex API. The retrieval pipeline combines BM25 full-text scoring with 384-dimensional transformer vector embeddings (all-MiniLM-L6-v2) indexed in Qdrant using HNSW, fused via Reciprocal Rank Fusion (RRF, k=60). The system is implemented as a microservice architecture on ASP.NET Core 8, React 18, SQL Server 2022, and Qdrant, achieving sub-50 ms vector retrieval on a 10,000-article corpus.

**Keywords:** semantic search, hybrid retrieval, transformer embeddings, BM25, Reciprocal Rank Fusion, personal scientific library, scientific literature management, metadata enrichment.

**Introduction.** Modern research practice is characterized by an unprecedented scale of scientific output. According to OpenAlex data [1], the global corpus of indexed publications exceeds 271 million works, growing at a rate of over two million new peer-reviewed articles per year. This scale has fundamentally transformed the literature review process: researchers must simultaneously discover relevant materials among millions of documents, organize personal collections, and track new publications in their domains. The intersection of these needs defines a clear functional gap in existing tooling, which this work aims to address.

**Work Goal.** The goal of this work is to design and implement a web platform that unifies personal scientific library management with AI-powered semantic search in a single coherent system – enabling researchers to store, annotate, and intelligently retrieve scientific publications through a unified interface integrated with open academic data sources.

**Problem Statement.** The core retrieval challenge is the vocabulary mismatch problem [2]: semantically equivalent concepts are expressed using distinct terminology across disciplines, time periods, and scientific traditions. A query for "deep learning for image classification" will systematically fail to retrieve papers indexed under "convolutional neural networks" or "CNN-based pattern recognition", despite their conceptual identity. BM25 [2] – the de facto standard for full-text search – ranks documents by weighted term frequency and cannot bridge this terminological gap. A second structural problem is the absence of a personal context layer: large academic indices (OpenAlex, Semantic Scholar) are global tools not designed for individual library curation, while bibliography managers (Mendeley, Zotero) lack intelligent retrieval entirely [1]. This creates a workflow fragmentation that forces researchers to maintain parallel tools for search and storage.

**Main Part.** Husserl addresses these challenges through a three-component architecture:

**1. Personal Scientific Library.** The library module provides DOI-based article import with automatic metadata retrieval from the OpenAlex REST API [1], returning structured data including authors, venue, abstract, concepts, and citation counts. Users may also upload PDF files with automatic text extraction for full-text indexing. Publications are organized into named collections with user-defined tags. A PDF annotation subsystem supports fragment-level notes with persistent storage linked to document coordinates. A subscription engine polls the OpenAlex API daily for new publications matching user-defined author or concept filters, delivering email digest notifications.

**2. Hybrid Semantic Retrieval Pipeline.** The search engine implements a two-stage hybrid approach. Stage one applies BM25 full-text scoring via SQL Server 2022 Full-Text Search, providing high-precision retrieval for specific terminology. The lexical stage parses and indexes the

article title, abstract, and the extractable text layer of any attached PDF, returning the top 100 candidates; scanned PDFs lacking a machine-readable text layer are excluded from full-text matching. Stage two generates dense vector representations of article abstracts using the all-MiniLM-L6-v2 sentence-transformer model [3] — a compact encoder competitive on the MTEB embedding benchmark [10] — producing 384-dimensional embeddings that encode meaning independently of surface form; these embeddings are generated from the title and abstract only, not the full body text, because the encoder truncates inputs beyond 256 word-pieces (full-text passage embedding is left to future work). These embeddings are indexed in Qdrant using the Hierarchical Navigable Small World (HNSW) algorithm [5], achieving approximate nearest-neighbor retrieval in O(log n) time with sub-50 ms latency on a 10,000-article corpus. The results of both retrieval stages are merged using Reciprocal Rank Fusion [6]:

$$RRF(d) = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{k + rank_i(d)},$$

where N is the number of ranked lists being fused (here N = 2: the BM25 and vector result lists), k = 60 is a smoothing constant, and $rank_i(d)$ is the rank of document d in the i-th list (a document absent from a list contributes nothing). RRF requires no score normalization, making it robust to the heterogeneous scoring scales of BM25 and cosine similarity; recent analyses of fusion functions confirm the robustness of rank-based fusion such as RRF [7]. For scientific content specifically, the system optionally supports SPECTER2 embeddings [4], which incorporate citation-graph structure to improve domain-specific retrieval.

**3. Recommendations and Graph Visualization.** The platform provides citation graph visualization for individual articles, rendering the network of cited and citing works as an interactive force-directed graph. Personalized recommendations are generated by computing cosine similarity between the embedding of a target article and all indexed publications, returning the top-k semantically nearest neighbors.

**System Architecture.** Husserl follows a microservice decomposition with three independently deployable services: (i) an ASP.NET Core 8 REST API implementing authentication (JWT), library management, search orchestration, and subscription processing; (ii) a React 18 Single Page Application providing the user interface with embedded PDF.js viewer and interactive citation graph; (iii) a Python FastAPI embedding microservice using the sentence-transformers library for on-demand and batch vector generation. Persistence is split between SQL Server 2022 (relational metadata, user data, annotations) and Qdrant (vector index with payload filtering). The system supports three access roles: registered users with full library access, anonymous users with read-only search, and administrators with platform management capabilities.

**Preliminary Evaluation.** Search effectiveness is measured with two rank-aware metrics: Mean Reciprocal Rank at cut-off 10 (MRR@10), which rewards placing the first relevant document near the top of the list, and Normalized Discounted Cumulative Gain at cut-off 10 (NDCG@10), which credits graded relevance across all ten positions. Three configurations were benchmarked on the BEIR SciFact dataset (5,183 documents, 300 test queries) following the zero-shot evaluation protocol of Thakur et al. [9]: BM25-only (lexical), vector-only using all-MiniLM-L6-v2, and the hybrid RRF pipeline (k = 60). Results are shown in Table 1. Hybrid retrieval achieves the highest MRR@10 (0.6062), a +15.6 pp gain over BM25-only, confirming that RRF fusion reduces the vocabulary-mismatch penalty for precision-sensitive queries. NDCG@10 for the hybrid (0.6389) likewise exceeds BM25-only (+14.2 pp) and closely approaches the vector-only result (0.6451), with the marginal difference attributable to the BM25 component occasionally demoting highly relevant documents ranked higher by the vector retriever alone. These results are consistent with

reported gains for dense and hybrid retrieval [7, 8] and validate the hybrid architecture as the preferred default for the platform.

Table 1

**Retrieval effectiveness on BEIR SciFact (test split, cut-off = 10)**

| Configuration | MRR@10 | NDCG@10 |
|---|---|---|
| BM25-only | 0.5242 | 0.5597 |
| Vector-only (all-MiniLM-L6-v2) | 0.6047 | 0.6451 |
| **Hybrid (BM25 + vector, RRF k = 60)** | **0.6062** | 0.6389 |

**Conclusions.** Husserl fills a well-defined gap in the scientific tooling landscape by combining personal library management, AI-powered hybrid semantic search, PDF annotation, citation graph visualization, and automated metadata enrichment in a single integrated platform. The hybrid BM25 + transformer embedding architecture with RRF fusion overcomes the vocabulary mismatch problem while preserving lexical precision, and its ranking quality is assessed with MRR@10 and NDCG@10 against BM25-only and vector-only baselines to isolate the benefit of semantic fusion. Comparative analysis of existing platforms (OpenAlex, Semantic Scholar, Connected Papers, Mendeley, Zotero) confirms that no existing solution provides all five capabilities simultaneously. The microservice architecture ensures independent scalability of the embedding and search components. Future directions include full-text PDF embedding, collaborative collection sharing, and fine-tuning of domain-specific embedding models on scientific citation corpora.

## References


1. Priem, J., Piwowar, H., Orr, R.: OpenAlex: A fully-open index of the world's scholarly works, authors, venues, institutions, and concepts. arXiv:2205.01833 (2022).
2. Robertson, S., Zaragoza, H.: The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond. Found. Trends Inf. Retr. 3(4), 333–389 (2009).
3. Reimers, N., Gurevych, I.: Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. In: Proc. EMNLP-IJCNLP, pp. 3982–3992 (2019).
4. Singh, A., D'Arcy, M., Cohan, A., Downey, D., Feldman, S.: SciRepEval: A multi-format benchmark for scientific document representations (SPECTER2). In: Proc. EMNLP, pp. 5548–5566 (2023).
5. Malkov, Y., Yashunin, D.: Efficient and robust approximate nearest neighbor search using hierarchical navigable small world graphs. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 42(4), 824–836 (2020).
6. Cormack, G., Clarke, C., Büttcher, S.: Reciprocal rank fusion outperforms Condorcet and individual rank learning methods. In: Proc. SIGIR, pp. 758–759 (2009).
7. Bruch, S., Gai, S., Ingber, A.: An analysis of fusion functions for hybrid retrieval. ACM Trans. Inf. Syst. 42(1), Article 20 (2023).
8. Zhao, W.X., Liu, J., Ren, R., Wen, J.-R.: Dense text retrieval based on pretrained language models: A survey. ACM Trans. Inf. Syst. 42(4), Article 89 (2024).
9. Thakur, N., Reimers, N., Rücklé, A., Srivastava, A., Gurevych, I.: BEIR: A heterogeneous benchmark for zero-shot evaluation of information retrieval models. In: Proc. NeurIPS Datasets and Benchmarks Track (2021).
10. Muennighoff, N., Tazi, N., Magne, L., Reimers, N.: MTEB: Massive text embedding benchmark. In: Proc. EACL, pp. 2014–2037 (2023).

# QUALITY ASSESSMENT OF VISUAL RECOMMENDATIONS: A THREE-LEVEL FRAMEWORK OF SIMILARITY, RELEVANCE, AND USER EXPERIENCE METRICS

**Tyskyi Kh.**
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

**Abstract.** This paper proposes a three-level approach to quality assessment of visual recommendations in image-based product search systems for e-commerce. The first level measures similarity in the embedding vector space using cosine similarity or Euclidean distance, with the metric choice determined by the model's training loss function. The second level evaluates ranking relevance through information retrieval metrics, including Precision@K, Recall@K, MAP and NDCG@K, with the interpretation of relevance ranging from exact-product match to category or stylistic similarity. The third level captures user experience through behavioural signals (click-through rate, conversion rate, time to first useful click) and subjective satisfaction measures, the correlation between which and purely technical metrics is known to be only moderate. The proposed approach integrates offline validation on labelled datasets with online evaluation via A/B testing, providing a coherent framework for model selection, index parameter tuning and ranking algorithm refinement.

**Keywords:** visual search, image retrieval, recommendation systems, evaluation metrics, embedding vectors, user experience, e-commerce.

**Introduction.** Visual search and recommendation systems for products based on image queries, built upon deep neural networks (CNN architectures, vision-language models such as CLIP and SigLIP), have become a key tool for modern e-commerce platforms. The standard pipeline of such a system includes image preprocessing (normalization, cropping, background removal), embedding vector generation via a neural network, indexing and nearest-neighbour search in a vector database using approximate search methods (HNSW, FAISS), and result ranking. This approach scales well to million-item catalogues, but requires a consistent and comprehensive quality assessment methodology that addresses several interrelated dimensions of system performance.

A critical component of the pipeline is the approximate nearest-neighbour (ANN) search layer, which determines the trade-off between retrieval speed and accuracy at scale. Modern ANN algorithms such as Hierarchical Navigable Small World (HNSW) graphs accept configuration parameters (e.g., the number of neighbours per layer M, the construction search depth efConstruction, and the query-time beam width efSearch) that directly affect recall and latency. Managed vector search services, including Google Vertex AI Vector Search, further introduce shard count and replica configuration, enabling horizontal scaling across millions of indexed vectors. The tuning of these parameters constitutes a separate optimization problem that must be evaluated jointly with embedding quality and ranking logic, since a high-quality embedding model paired with a poorly configured index may underperform a weaker model with optimally tuned search parameters.

**The purpose of the work** is to substantiate a comprehensive three-level approach to quality assessment of visual recommendations, which integrates similarity, relevance and user experience metrics into a unified methodology for validating embedding models, indexing parameters and ranking mechanisms in image-based product search systems.

**Formulation of the problem.** The quality of visual recommendations cannot be reduced to a single indicator. Three interrelated levels must be considered: (1) technical similarity in the embedding vector space, determined by the chosen distance measure and properties of the vector-generating model; (2) ranking relevance from the information retrieval perspective, defined against ground-truth labelling of relevant results; and (3) user experience (UX), which reflects the actual usefulness of the system for end users and does not always directly correlate with technical metrics. A unified evaluation methodology must therefore combine offline measurements on labelled datasets with online behavioural analysis in production environments.

**Solving the problem.** At the first level, similarity metrics define the distance between embedding vectors in the feature space. The most common measures are cosine similarity, which focuses on the angle between vectors, and L2 (Euclidean) distance, which accounts for the absolute difference of coordinates. The choice of metric should align with the loss function used during model training: for models with L2 normalization on the unit hypersphere (SigLIP, CLIP) the natural choice is cosine similarity or dot product, whereas for architectures with L2-based contrastive loss functions, Euclidean distance may yield better results [1, 2].

In practice, the choice of embedding model significantly impacts retrieval performance in domain-specific applications. Vision-language models trained on fashion-specific corpora, such as Marqo FashionSigLIP (768-dimensional vectors), consistently outperform general-purpose multimodal encoders in vertical product search tasks. Experimental comparison on a stratified test dataset of 200 queries across four content categories (catalogue images, real photographs, competitor products, and synthetic modifications) demonstrates that FashionSigLIP achieves Precision@1 = 0.875 and MAP@30 = 0.762, surpassing general multimodal models by 8-9% and fashion-specific CLIP variants by 14-23% across all key metrics. Furthermore, image preprocessing through background removal using segmentation models before embedding generation substantially improves retrieval accuracy for real-world photographs: eliminating background clutter yields a 14.3% improvement in Precision@5 and a 10.4% improvement in MAP for queries containing complex backgrounds.

At the second level, relevance metrics evaluate the ranked output against ground-truth labelling. Standard information retrieval metrics Precision@K and Recall@K measure the precision and completeness of the result set, while the F1 score combines them into a single aggregated value. To assess ranking quality, Mean Average Precision (MAP) and Normalized Discounted Cumulative Gain (NDCG@K) are applied, both of which account for the position of relevant results in the list. It is important to note that the notion of "relevance" in visual search is multi-level: an exact product match, membership in the same category, or only stylistic proximity - each of these interpretations requires its own ground-truth labelling.

Construction of ground-truth datasets for visual search evaluation requires multi-rater annotation protocols with explicit inter-annotator agreement measures. The use of Cohen's kappa coefficient (with a minimum acceptable threshold of $\kappa \geq 0.75$) ensures reliable labelling quality, while stratification of queries across content categories provides comprehensive coverage of real-world use cases. Additionally, Hit Rate@K, defined as the proportion of queries for which at least one relevant result appears in the top K positions, serves as a practical complementary metric that directly reflects the probability of a satisfactory user experience in a single interaction. Experimental results on deployed fashion search systems show Hit Rate@5 values exceeding 0.95 for domain-specific embedding models, confirming their effectiveness in ensuring that users encounter relevant products within the first few results.

At the third level, user experience metrics include behavioural indicators (click-through rate, conversion rate, time to first useful click, the proportion of repeated queries and drop-offs) and subjective satisfaction scores obtained through user surveys. Empirical studies demonstrate that the correlation between technical system performance and subjective user satisfaction is only moderate ($r \approx 0.53$) [3], which means that UX quality is not exhausted by output accuracy: the perception of the system is also significantly influenced by response speed, interface design and clarity of the result presentation.

In production environments with specialized user populations, such as retail consultants in fashion e-commerce, satisfaction surveys employing structured rating scales (1-5 Likert scale) across dimensions of relevance accuracy, response latency tolerance, and interface usability provide granular feedback for iterative system optimization. Studies of deployed visual search systems report positive satisfaction rates exceeding 80% among professional users when end-to-end retrieval latency remains below 5 seconds, with image preprocessing (particularly background removal) identified as the single most impactful factor for user-perceived quality improvement in scenarios involving real-world photographs rather than studio catalogue images.

The proposed three-level approach combines offline validation on labelled datasets with online evaluation through A/B testing and behavioural signal analysis in a production environment. Such integration enables informed decisions regarding embedding model selection, tuning of approximate search index parameters and modification of ranking algorithms. Empirical results reported in the literature confirm that visual search based on modern vision-language models can substantially improve key indicators: fine-tuning the SigLIP model on image-product pairs leads to NDCG gains of up to 9.1%, while integrating visual search into e-commerce catalogues increases CTR by up to 50% and conversion by up to 14% [4]. At the same time, the maximum practical effect is achieved only when the content-based approach is combined with interactive user feedback mechanisms, such as those in systems with visual relevance feedback [5].

An important practical consideration is the decomposition of end-to-end latency across pipeline stages, as this directly influences user-perceived responsiveness and, consequently, satisfaction scores at the third evaluation level. Profiling of deployed systems reveals that image preprocessing (background removal via segmentation models) typically accounts for the largest share of total latency (approximately 60%), followed by embedding generation (approximately 23%), while the vector search itself contributes less than 2% of total processing time. This distribution suggests that latency optimization efforts should prioritize preprocessing efficiency, for instance, through model quantization using ONNX Runtime or batched inference, rather than focusing exclusively on index-level tuning. Such cross-level analysis demonstrates the practical value of the proposed framework: decisions at the preprocessing stage (level one) propagate measurably to user experience outcomes (level three).

**Conclusion.** The quality of visual recommendations cannot be adequately evaluated through a single indicator: technical similarity, information relevance and user experience reflect different aspects of system performance and are not interchangeable. Promising directions for further research include the development of integrated composite metrics combining all three levels with weighting coefficients tuned to a specific business scenario, as well as the implementation of interactive relevance feedback mechanisms for dynamic refinement of the output based on user actions.

## References


1. Musgrave, K., Belongie, S., Lim, S.-N.: A Metric Learning Reality Check. In: Computer Vision - ECCV 2020, LNCS, vol. 12370, pp. 681-699. Springer (2020). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58595-2_41
2. Zhai, X., Mustafa, B., Kolesnikov, A., Beyer, L.: Sigmoid loss for language image pre-training. In: Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 11975–11986 (2023).
3. Knijnenburg, B.P., Willemsen, M.C.: Evaluating Recommender Systems with User Experiments. In: Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B. (eds.) Recommender Systems Handbook, 3rd edn., pp. 757-796. Springer (2022). https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4_20
4. Yada, Y., Suzuki, T., Mukai, R., Watanabe, K.: Improving visual recommendation on e-commerce platforms using vision-language models. arXiv preprint arXiv:2510.13359 (2025).
5. Khaertdinov, B., Popa, M., Tintarev, N.: VisualReF: Interactive image search prototype with visual relevance feedback. In: Proceedings of the 19th ACM Conference on Recommender Systems (RecSys '25), pp. 1353–1356 (2025).

# ADAPTIVE METAHEURISTIC METHODS BASED ON THERMAL ENERGY FOR INTELLIGENT SYSTEMS IN INDUSTRY AND BUILDING ENERGY OPTIMIZATION

**Utkina T.[1], Fedorov E.[1], Leshchenko M.[1], Sipko O.[2], Palamarchuk D.[1]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Nowadays, intelligent systems and technologies in industry play an important role, with parametric identification being a key task. Numerical optimization methods are widely applied, and metaheuristic approaches have recently gained particular relevance. This paper proposes improved metaheuristic methods based on thermal energy: state-of-matter search with dynamic direction vector control, heat transfer search with dynamic phase control, kinetic gas molecule optimization with dynamic absolute temperature, and heat exchange optimization with adaptive temperature control. Comparative experiments show that the proposed methods achieve faster convergence and lower error compared to existing thermal-energy-based approaches. Their application can enhance the efficiency of intelligent systems in industry and building energy optimization.

**Keywords**: Intelligent systems, Heat-based metaheuristics, Numerical optimization, Energy efficiency, Building energy systems, Decision support, Energy optimization.

**Introduction**. Nowadays, intelligent systems play an essential role in industry, ensuring automation and optimization of production processes. A key task of such systems is parametric identification, which requires accurate modeling and prediction of complex objects. Numerical optimization methods are widely used to solve this problem, with metaheuristic methods playing a particularly important role [1]. Metaheuristic algorithms, distinguished by adaptability and efficiency, provide faster convergence and reduce the risk of local optima. Recent studies emphasize the potential of physical principles in optimization, with thermal-energy-based metaheuristics offering innovative solutions that account for heat transfer and energy distribution dynamics.

**The purpose of the work**. The purpose of this study is to improve the efficiency of numerical optimization by developing adaptive metaheuristic methods based on thermal energy. The proposed approaches introduce dynamic control parameters that enhance the accuracy and speed of solution search. Their application is aimed at supporting intelligent systems in industry, process control, diagnostics, and building energy optimization.

**Formulation of the problem**. Despite the active development of metaheuristic algorithms, existing thermal-energy-based approaches still demonstrate several drawbacks. Current methods of state-of-matter search, heat transfer search, kinetic gas molecule optimization, and heat exchange optimization lack adaptive control of parameters, which limits their accuracy and increases computational time. As a result, the efficiency of numerical optimization in intelligent systems remains insufficient. Unlike classical heuristics, metaheuristics combine various approaches and adapt to the specifics of the problem being solved [2]. Therefore, the problem is to develop improved metaheuristic methods that incorporate dynamic control mechanisms, ensuring faster convergence and higher precision in solving optimization tasks. Recent research in the field of numerical optimization indicates that one of the most promising areas is the application of physical principles in the development of metaheuristic algorithms. In particular, metaheuristics based on thermal energy represent an innovative approach that allows for the modeling of optimization processes while accounting for the dynamics of heat transfer and energy distribution. These methods are applied in both discrete and continuous optimization, as well as in expert systems [1].

**Solving the problem**. This paper proposes improved metaheuristic methods based on thermal energy concepts, which are aimed at enhancing the efficiency of numerical optimization. The developed algorithms include: improved search for states of matter using dynamic control of the direction vector; improved search for heat transfer, taking into account phase control of heat transfer processes; optimization of the kinetic gas molecule using dynamic absolute temperature; optimization of heat exchange based on adaptive control of temperature parameters.

The proposed methods are designed to improve the accuracy and speed of the solution search

process in numerical optimization problems. Their application can be useful in various intelligent systems used in industry, such as process control, equipment diagnostics, and resource cost forecasting. In addition, the proposed methods can be applied to energy efficiency optimization problems, including building energy systems and retrofit planning.

Thus, the development and improvement of metaheuristic methods based on the principles of thermal energy represent a promising area of research that contributes to the further advancement of intelligent technologies in industry.

The currently developed metaheuristics have one or more of the following drawbacks:

- improved search for states of matter using dynamic control of the direction vector;
- improved search for heat transfer, taking into account phase control of heat transfer processes;
- optimization of the kinetic gas molecule using dynamic absolute temperature;
- optimization of heat exchange based on adaptive control of temperature parameters.

Accordingly, the task of developing efficient metaheuristic optimization methods arises [3].

Physical metaheuristics are among the most popular types of metaheuristics; these include thermal energy-based metaheuristics, which can be used to solve numerical optimization problems [2].

The work aims to improve the efficiency of numerical optimization by using heat-based metaheuristic methods.

To achieve this goal, the following tasks must be solved:

1. Create an improved search for states of matter.
2. Develop an improved search for heat transfer.
3. Create an improved optimization of the kinetic gas molecule.
4. Develop an improved optimization of heat exchange.
5. Conduct a numerical study of the proposed methods based on thermal energy.

The proposed methods are aimed at improving the accuracy and speed of the solution search process in numerical optimization problems. Their application may prove useful in various intelligent systems used in industry, such as process control, equipment diagnostics, and resource cost forecasting.

For all four methods, the solution search was performed on the Rastrigin test function

$$F(x)=10M+\sum_{j=1}^{M}(x_j^2\text{-}10\cos(2\pi x_j)),$$

which has a global minimum $x$=0.

The results of the comparison between the proposed methods and traditional methods based on the thermal energy are presented in Table 1, Table 2, Table 3, Table 4.

Table 1

**Comparison of the proposed and traditional search for states of matter**

| Number of iterations | | Root mean square error of the method | |
|---|---|---|---|
| proposed | existing | proposed | existing |
| 1000 | 2000 | 0.06 | 0.11 |

Table 2

**Comparison of the proposed and conventional heat transfer search**

| Number of iterations | | Root mean square error of the method | |
|---|---|---|---|
| proposed | existing | proposed | existing |
| 500 | 1000 | 0.02 | 0.07 |

Table 3

**Comparison of the proposed and conventional kinetic gas molecule optimization**

| Number of iterations | | Root mean square error of the method | |
|---|---|---|---|
| proposed | existing | proposed | existing |
| 750 | 1500 | 0.04 | 0.09 |

Table 4

**Comparison of the proposed and traditional heat exchange optimization**

| Number of iterations | | Root mean square error of the method | |
|---|---|---|---|
| proposed | existing | proposed | existing |
| 1500 | 3000 | 0.08 | 0.13 |

The proposed improved search for states of matter allows for the use of a dynamic control parameter for the direction vector. The proposed improved heat transfer search allows for the use of a dynamic heat transfer phase control parameter. The proposed improved optimization of the kinetic gas molecule allows for the use of a dynamic absolute temperature. The proposed improved optimization of heat transfer allows for the use of a dynamic temperature control parameter. The use of dynamic parameters in these methods enables a global search in the early stages of the method and a local search in the later stages, making the proposed method more accurate and faster than the existing one (Table 1-4).

**Conclusion.** A novel state-of-matter search has been developed. By introducing a dynamic parameter to control the direction vector, this method achieves higher accuracy and faster performance compared to existing approaches.

A refined heat transfer search has been created. The use of a dynamic heat transfer phase control parameter ensures greater efficiency and precision than traditional methods.

An enhanced optimization of the kinetic gas molecule model has been proposed. Through the application of dynamic absolute temperature, this approach demonstrates superior speed and accuracy compared to existing techniques.

A redesigned thermal exchange optimization has been introduced. By employing a dynamic temperature control parameter, the method provides faster convergence and more accurate results than conventional solutions.

Future research will focus on applying the proposed thermal-energy-based metaheuristic methods to various intelligent systems and industrial technologies.

## References


1. A. Vasuki: Nature Inspired Optimization Algorithms, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL, (2020). doi:10.1201/9780429289071.
2. A. Slowik: Swarm Intelligence Algorithms A Tutorial, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL, (2021). doi:10.1201/9780429422614.
3. A. Nayyar, D.-N. Le, N. G. Nguyen: Advances in Swarm Intelligence for Optimizing Problems in Computer Science, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL, (2019). doi:10.1201/9780429445927.

# SYNTHETIC AERIAL IMAGE GENERATION FOR IMPROVING UAV DETECTION MODELS

**Yurchuk I.[1], Obertan D.-M.[1], Semenchenko T.[1]**
[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. This work presents a pipeline for generating synthetic aerial imagery to improve UAV detection models. The approach combines real satellite backgrounds with physically based rendering of aerial targets. Large satellite mosaics from rural areas of eastern Ukraine are used as terrain textures in Blender, where photorealistic images of a Shahed-131 target are rendered with randomized lighting, atmosphere, object pose, camera position, and focal length. Each generated image is automatically paired with YOLO-format annotations and metadata. The synthetic dataset is intended to supplement real training data and potentially improve detection performance under conditions that are difficult to capture using real imagery alone.

**Keywords**: synthetic data, UAV detection, aerial imagery, Blender, data augmentation, object detection.

**Introduction**. Modern object detection models require large and diverse annotated datasets. In UAV detection, real data collection is limited by operational restrictions, target availability, and the need to cover many terrain, viewpoint, lighting, and scale conditions. This is especially important for small aerial targets, which may occupy only a small part of the image and be difficult to distinguish from background clutter [12–15].

Synthetic data generation can reduce this limitation by creating controlled annotated images with varied object positions, camera parameters, lighting, and environments. Foundational works on synthetic data and domain randomization show that simulated images can improve learning when real annotated data are limited [1–3]. At the same time, their effectiveness depends on reducing the sim-to-real gap between generated and real images [3, 4].

Recent synthetic and real UAV datasets, including SynDroneVision, SynthAirDrone, SimD3, VisioDECT, and MMFW-UAV, demonstrate the relevance of diverse data for drone detection and air-to-air vision tasks [5–8, 11]. However, many existing datasets are focused on general drone detection scenarios, while specific operational targets, backgrounds, and viewpoints may still be underrepresented.

**The purpose of the work** is to develop a synthetic data generation pipeline that produces realistic aerial images and annotations for UAV detection, and to use them for additional model training.

**Formulation of the problem**. Real UAV datasets often do not contain enough variation in terrain types, distances, camera angles, atmospheric conditions, and object scales. As a result, models trained only on real data may lose accuracy in new or complex scenarios. Therefore, a controlled generation process is needed to produce realistic, diverse, and accurately annotated training samples.

**Solving the problem**. The proposed pipeline includes two stages: base satellite scene generation and synthetic aerial image rendering. First, satellite scenes are generated from real locations in the steppe zone of eastern Ukraine, including fields, forest belts, and small settlements. For each location, a 33×33 mosaic of Mapbox Satellite tiles is downloaded at zoom level 16 in Web Mercator projection. The final mosaic has a size of 16,896×16,896 pixels and covers approximately 170–183 $km^2$ with a ground sampling distance of about 0.77–0.80 m/px.

Fig. 1 shows examples of real aerial images containing UAV targets, which are used as baseline data for model training and evaluation. However, such images often provide limited diversity in terms of target scale, background type, viewpoint, and imaging conditions. To extend the training dataset, synthetic images were generated by placing a rendered UAV target onto realistic satellite-based terrain backgrounds with controlled randomization of scene parameters. Examples of such generated synthetic aerial images are shown in Fig. 2.

At the rendering stage, the satellite mosaics are used as terrain textures in Blender. This follows the general idea of procedural and CGI-based dataset generation, where 3D environments allow flexible control over scene parameters and automatic annotation [9, 10]. A textured Shahed-131 model is placed in the scene with randomized altitude, heading, pitch, and roll. Lighting is simulated using the Nishita atmospheric sky model with randomized sun and atmosphere parameters. The virtual camera position, distance to the target, elevation angle, focal length, and lens shift are also randomized.



Fig. 1. Examples of real aerial images with UAV targets



Fig. 2. Examples of synthetic aerial images generated using real satellite-based terrain mosaics and a rendered UAV target

Fig. 3 compares the distribution of UAV bounding-box sizes in real and synthetic images. Synthetic samples mainly cover small and medium target scales, which are important for UAV detection because distant aerial objects often occupy only a small part of the image [12–15]. This shows that the generated data can supplement the real dataset with additional challenging examples and improve scale diversity during training.

Before rendering, the target bounding box is projected into image space. Frames where the object is outside the camera view or too small are discarded. Each accepted frame is saved as a 1280×720 PNG image with a YOLO label file and JSON metadata.

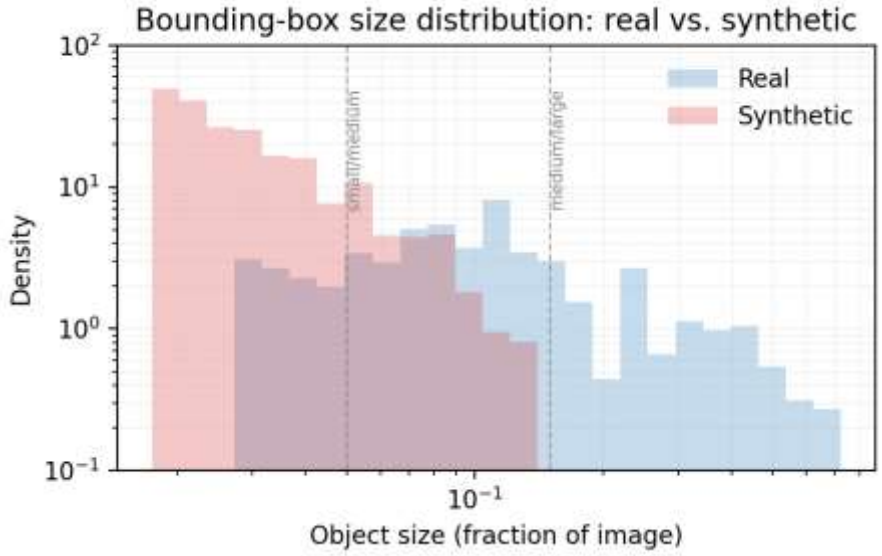



Fig. 3. Distribution of UAV bounding-box sizes in real and synthetic images

The generated images were added to the real dataset in different amounts to evaluate their effect on detection quality. All experiments used the same train/validation split of real images. Synthetic samples were added only to the training set, while validation was performed exclusively on real images. The model architecture (YOLO11n pretrained on COCO) and all training hyperparameters, including 100 epochs, an image size of 640, a batch size of 32, a cosine learning rate schedule, AMP, and the same augmentation pipeline, were kept identical across all dataset variants. Thus, only the number of synthetic training samples was varied. The preliminary detection results for different amounts of added synthetic samples are presented in Table 1. Prior works indicate that synthetic data is usually most useful as a supplement to real data, while excessive synthetic data may increase the domain gap [1–4].

Table 1

**Preliminary evaluation of the effect of synthetic training samples on UAV detection performance**

| Dataset | mAP50 | mAP50-95 |
|---|---|---|
| Real data only | 0.6873 | 0.3470 |
| Real data + 50 synthetic samples | 0.6877 | 0.3521 |
| Real data + 100 synthetic samples | 0.6954 | 0.3803 |
| Real data + 150 synthetic samples | 0.6212 | 0.3568 |

The preliminary results suggest that adding a moderate number of synthetic samples can improve detection quality. The best result was obtained with 100 synthetic samples, where both mAP50 and mAP50-95 increased compared with the baseline. However, adding 150 synthetic samples reduced mAP50, possibly due to domain gap or dataset imbalance.

**Conclusion**. A synthetic aerial data generation pipeline for UAV detection has been proposed. It combines real satellite terrain mosaics, photorealistic rendering, and controlled randomization of scene parameters. The generated images are automatically annotated and can be directly used for YOLO-based training. The preliminary results suggest that the proposed synthetic data can supplement limited real datasets and may improve detection performance when used in moderate amounts. Further work will include testing additional synthetic-to-real ratios, evaluating larger

synthetic datasets, and comparing the approach with recent small-object, air-to-air, and edge-oriented UAV detection methods [11–15].

## References


1. Tobin, J., Fong, R., Ray, A., Schneider, J., Zaremba, W., Abbeel, P.: Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2017, pp. 23–30, (2017). doi: 10.1109/IROS.2017.8202133.
2. Westerski, A., Teck, F.W.: Synthetic Data for Object Detection with Neural Networks: State of the Art Survey of Domain Randomisation Techniques. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, (2024). doi: 10.1145/3637064.
3. Horváth, D., Erdős, G., Istenes, Z., Horváth, T., Földi, S.: Object Detection Using Sim2Real Domain Randomization for Robotic Applications. IEEE Transactions on Robotics, 39(2), pp. 1225–1243, (2023). doi: 10.1109/TRO.2022.3207619.
4. Rüter, J., Durak, U., Dauer, J.C.: Investigating the Sim-to-Real Generalizability of Deep Learning Object Detection Models. Journal of Imaging, 10(10), 259, (2024). doi: 10.3390/jimaging10100259.
5. Lenhard, T.R., Weinmann, A., Franke, K., Koch, T.: SynDroneVision: A Synthetic Dataset for Image-Based Drone Detection. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2025, (2025). arXiv:2411.05633.
6. Guo, J., Chen, J., Zhang, T., Feng, Q.: SynthAirDrone: Synthetic Drone Detection Dataset for Airport-Runway Environments. Drones, 10(4), 306, (2026). doi: 10.3390/drones10040306.
7. Pandat, A., Muvva, K., Rajasekhar, P., Vinod, G., Shukla, R.: SimD3: A Synthetic Drone Dataset with Payload and Bird Distractor Modeling for Robust Detection. arXiv preprint arXiv:2601.14742, (2026).
8. Ajakwe, S.O. et al.: VisioDECT: A Robust Dataset for Aerial and Scenario-Based Multi-Drone Detection, Identification and Neutralization. Data in Brief, 65, 112448, (2026). doi: 10.1016/j.dib.2026.112448.
9. Gabriel, G.S., Sarmento, B.A., De Biase, L.C., Zuffo, M.K.: Synthetic Dataset Generation for Object Detection in MAV Applications. In Proceedings of the 16th International Micro Air Vehicle Conference and Competition, IMAV 2025, (2025).
10. Patel, R., Chandalia, D., Nayak, A., Jeyabose, A., Jijo, D.: CGI-Based Synthetic Data Generation and Detection Pipeline for Small Objects in Aerial Imagery. IEEE Access, 13, pp. 61192–61206, (2025). doi: 10.1109/ACCESS.2025.3553530.
11. Liu, Y., Sun, Z., Xi, L., Zhang, L., Dong, W., Chen, C., Lu, M., Fu, H., Deng, F.: MMFW-UAV Dataset: Multi-Sensor and Multi-View Fixed-Wing UAV Dataset for Air-to-Air Vision Tasks. Scientific Data, 12, 185, (2025). doi: 10.1038/s41597-025-04482-2.
12. Han, C., Ullah, M.R., Kayes, A., Hasan, K., Rouf, M.A., Hasan, M.R., Tao, S., Gengli, G., Billah, M.M.: Real-Time Small UAV Detection in Complex Airspace Using YOLOv11 with Residual Attention and High-Resolution Feature Enhancement. Journal of Imaging, 12(3), 140, (2026). doi: 10.3390/jimaging12030140.
13. Mi, Q., Chao, J., Chen, A., Zhang, K., Lai, J.: YOLO11s-UAV: An Advanced Algorithm for Small Object Detection in UAV Aerial Imagery. Journal of Imaging, 12(2), 69, (2026). doi: 10.3390/jimaging12020069.
14. Chen, P., Sa, H., Hu, Y., Cheng, Y., Wang, J.: SDD-YOLO: A Small-Target Detection Framework for Ground-to-Air Anti-UAV Surveillance with Edge-Efficient Deployment. arXiv preprint arXiv:2603.25218, (2026).
15. Zaritskyi, O.: Object Detection Models in Counter-Unmanned Aircraft Systems Based on Devices with Limited Computing Capabilities. In Proceedings of the 13th International Conference on Information Control Systems & Technologies, ICST 2025, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4048, pp. 317–328, (2025).

# ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DESIGN AND MAINTENANCE OF BRIDGES: A REVIEW OF MODERN METHODS AND TOOLS

**Zadorozhnyi D.A.**, **Ovcharenko O.A.**
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. The paper provides a comprehensive analysis of the implementation of artificial intelligence technologies at all stages of the bridge life cycle. The architecture of intelligent SHM systems, the use of Edge AI for instantaneous impact detection, and the 4K monitoring methodology using the SAHI technique are detailed. Special attention is paid to the Digital Twin concept and to solving the problem of AI model explainability.

**Keywords**: artificial intelligence, bridge life cycle, SHM, digital twin, Edge AI, predictive maintenance, SAHI.

**Introduction**. The relevance of automating bridge management processes is caused by the global crisis of infrastructure aging and the rapid growth of operational loads. As of 2024-2025, according to the analysis of the National Bridge Inventory (NBI) and ARTBA reports, about one third of the bridge stock of leading countries of the world (which amounts to more than 220 thousand structures) is in unsatisfactory condition and requires urgent reconstruction or full modernization [2]. For Ukraine, this problem is overcritical in the post-war recovery period, when thousands of structures have damage caused by military actions. Traditional monitoring methods based on manual inspections are too slow, subjective, and economically inefficient, since they make it possible to detect defects mainly at stages when repair requires significant capital investments. The transition from the reactive approach "repair after failure" to the proactive strategy of predictive maintenance becomes possible only due to the integration of inexpensive IoT (Internet of Things) sensors, the growth of computing power, and the development of deep learning methods capable of processing arrays of heterogeneous data [1, 6, 7]. Although the first concepts of implementing intelligent algorithms in bridge engineering appeared as early as the middle of the last century, their full practical implementation took place only with the emergence of highly powerful computing tools and innovative neural network structures [5]. A separate aspect of relevance is the digitalization of the design stage: modern algorithms of generative design and genetic optimization make it possible to analyze thousands of variants of bridge geometry within a short time, finding the most resistant to aerodynamic loads and economically profitable solutions, which was previously unattainable for traditional engineering methods.

**Formulation of the problem**. The statement of the research task consists in the systematization and integration of modern AI domains into a single hardware and software complex that accompanies the bridge throughout its entire life cycle. The task covers not only the development of data collection systems, but also the creation of reliable algorithms for identifying hidden damage in real time. An important aspect is overcoming the shortage of data on emergency states and developing methods of adaptive UAV navigation in complex spatial conditions without a GPS signal. The final goal is to create a system capable of automatically generating forecasts of the remaining useful life (RUL) and prioritizing repair works at the level of an entire network of structures [4, 7]. A separate challenge is the intelligent processing of unstructured information accumulated over decades of operation. The implementation of natural language processing (NLP) models makes it possible to automate the analysis of text reports from previous inspections. AI is capable of converting subjective descriptions by engineers (for example, "a medium-sized crack") into clear numerical condition scores, which ensures the objectivity of Bridge Management Systems (BMS) databases and makes it possible to take the historical context into account when predicting the degradation of a structure [7].

**Solving the problem**. The presentation of the research results shows that the basis for the intellectualization of the industry is Structural Health Monitoring (SHM) systems based on deep learning. Unlike classical spectral analysis, the use of convolutional (CNN) and recurrent (RNN)

neural networks makes it possible to automatically extract complex damage features from “raw” vibration signals, compensating for the influence of temperature and traffic [6, 7]. A striking example is the case of the KW51 railway bridge in Belgium, where, for damage identification, an approach showed effectiveness in which a neural network was trained on the results of finite element method (FEM) modelling, which ensured defect detection even under intensive noise interference with an accuracy rate of more than 95% [4]. Similar systems are deployed on objects such as the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, where more than 1200 sensors form a hierarchical IoT network that provides correlation analysis of wind, traffic, and structural responses in real time [8]. The reliability of such large-scale sensor networks directly depends on the energy independence of the nodes. The development of energy harvesting methods, where sensors are powered by the vibrations of the structure itself or by solar energy, makes it possible to provide autonomous monitoring for decades without the need to replace batteries in hard-to-reach zones of the bridge [6].

A separate technological vector is Edge AI (edge computing). The execution of ML models directly on onboard computing units makes it possible to detect critical events, such as vehicle impacts, with a latency of less than 1 ms [9]. For visual monitoring, the transition to 4K shooting using the SAHI (Slicing Aided Hyper Inference) technique is effective, which makes it possible to detect microdefects in high-resolution frames without loss of context [10]. The use of transformers (Vision Transformers) instead of standard CNNs allows the system, through self-attention, to analyze an image globally, without confusing cracks with traces of moisture or dirt [11]. Additionally integrated methods of non-destructive testing (NDT), such as ultrasonic and infrared scanning, make it possible to detect hidden concrete delaminations that are inaccessible to visual cameras [7]. In particular, the use of infrared thermography, enhanced by computer vision algorithms, makes it possible to segment thermal images and detect internal voids or concrete delaminations that do not appear visually. The application of Lamb waves in combination with deep neural networks (CNN) opens possibilities for diagnosing composite bridge elements, where traditional methods are often ineffective [7].

The central element of management is the Digital Twin concept, which synchronizes a static BIM model with dynamic data flows [1]. The case of the Stavå Bridge (Norway) proves that such integration makes it possible to detect anomalous damage development in time and prevent collapse by promptly closing traffic [12]. At the same time, the implementation of AI faces the problem of the “black box.” The development of explainable AI (XAI) is a necessary condition for ensuring engineers’ trust in algorithms and preserving the Human-in-the-loop principle in the management of critical infrastructure [6]. It is also important to consider “base rate bias,” since the rarity of serious damage can generate a large number of false alarms, which requires the implementation of robust anomaly filtering methods [6]. This makes it possible to mitigate the effect of “alarm fatigue.”

**Conclusion**. The integration of intelligent systems into the life cycle of bridges is the only possible path for the development of the industry. The convergence of deep learning, Edge AI, and digital twins makes it possible not only to reduce maintenance costs, but also to radically increase the safety of Ukraine’s transport infrastructure in the post-war period. This creates prerequisites for the development of resilient and adaptive systems capable of functioning under conditions of a changing climate and extreme loads.

## References


1. Araya-Santelices, P., Grande, Z., Atencio, E., Lozano-Galant, J.A.: Bridge management with AI, UAVs, and BIM. Automation in Construction 175, 106170 (2025). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106170.
2. ARTBA: 2024 Annual Bridge Report: State of the Nation’s Bridges. American Road & Transportation Builders Association, Washington, DC (2024).
3. Panigati, T., Zini, M., Striccoli, D., Giordano, P.F., Tonelli, D., Limongelli, M.P., Zonta, D.: Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. Automation in Construction 173, 106101 (2025). https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106101.

4. Qiu, Y., Ahmed, B., Abueidda, D.W., El-Sekelly, W., de Soto, B.G., Abdoun, T., Ji, H., Qiu, J., Mobasher, M.E.: Damage identification for bridges using machine learning: Development and application to KW51 bridge. Digital Engineering 10, 100103 (2026). https://doi.org/10.1016/j.dte.2026.100103.
5. Reich, Y.: Artificial intelligence in bridge engineering. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 11(6), 433-445 (1996). https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.1996.tb00355.x.
6. Spencer, B.F., Sim, S.-H., Kim, R.E., Yoon, H.: Advances in artificial intelligence for structural health monitoring: A comprehensive review. KSCE Journal of Civil Engineering 29(3), 100203 (2025). https://doi.org/10.1016/j.kscej.2025.100203.
7. Zinno, R., Haghshenas, S.S., Guido, G., Rashvand, K., Vitale, A., Sarhadi, A.: The state of the art of artificial intelligence approaches and new technologies in structural health monitoring of bridges. Applied Sciences 13(1), 97 (2023). https://doi.org/10.3390/app13010097.
8. Yan, Y., Mao, X., Wang, X., Yu, X., Fang, L.: Design and implementation of a structural health monitoring system for a large sea-crossing project with bridges and tunnel. Shock and Vibration 2019, 2832089 (2019). https://doi.org/10.1155/2019/2832089.
9. Lawal, O., Veluthedath Shajihan, S.A., Mechitov, K., Spencer, B.F.: Edge integration of artificial intelligence into wireless smart sensor platforms for railroad bridge impact detection. Sensors 24(17), 5633 (2024). https://doi.org/10.3390/s24175633.
10. Akyon, F.C., Altinuc, S.O., Temizel, A.: Slicing Aided Hyper Inference and fine-tuning for small object detection. arXiv (2022). https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.06934.
11. Zhang, J., Zheng, Z., Ling, T.: Transformer in civil engineering defect detection: A survey. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) 12(5), 1330-1359 (2025). https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.11.008.
12. Hagen, A., Andersen, T.M.: Asset management, condition monitoring and Digital Twins: damage detection and virtual inspection on a reinforced concrete bridge. Structure and Infrastructure Engineering (2024). https://doi.org/10.1080/15732479.2024.2311911.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF HUMAN–AI INTERACTION IN PAIR PROGRAMMING: A STUDY OF CODELLAMA AND GPT-4

**Zhovtonizhko I.[1,2], Deineha O.[1]**
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
[2]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This research investigates the transition of software engineering into a human-AI partnership, where intelligent systems act as proactive collaborators in code generation and architectural optimization. The study establishes a formal framework integrating mathematical programming and game theory to optimize resource allocation and strategic interactions, referring to the simplex method as a standard solution approach for linear programming models. By combining qualitative comparison with a pilot pass@1 experiment on 30 Python tasks, the paper shows that GPT-4 achieved higher first-attempt correctness than CodeLlama, suggesting lower verification effort in the selected programming tasks.

**Keywords:** Mathematical programming, linear programming, Game theory, simplex method, AI-assisted pair programming, Large Language Models (LLMs), human-AI collaboration, cognitive load.

**Introduction**. Pair programming involving Artificial Intelligence (AI) represents a novel engineering approach in which a human works not with another programmer, but with an intelligent system capable of generating code, suggesting solutions, and maintaining dialogue. In this collaboration, the AI model does not merely perform monotonous or template-based actions; it acts as a partner – automating routine segments of work while maintaining the capacity to adapt to new information. This combination creates an ecosystem where human flexibility, intuition, and experience are augmented by the high productivity inherent in algorithmic systems.

AI pair programming is not limited to code autocompletion; it offers initial fragments, formulates alternative approaches, and can provide insights regarding architecture or optimization. Mathematical programming serves as a foundational analytical architecture for optimizing complex industrial systems and high-level decision-making processes. Within this architecture, linear programming is the most widely applied technique for identifying the best possible allocation of limited resources among competing activities. Recent developments in LLM models have significantly transformed this landscape by enabling the automated translation of natural language problem descriptions into formal symbolic representations. This AI interaction allows non-experts to access sophisticated optimization tools, as the models can generate executable code for high-performance solvers such as Gurobi or CPLEX.

Throughout this process, the human retains primary responsibility for the project logic, evaluates the proposed solutions, corrects them, and makes final decisions. The role of each partner is dynamic; depending on the complexity of the task or the developer's experience, the AI may take more initiative or, conversely, perform primarily supportive functions.

**The purpose of the work** is to formalize human–AI role allocation in pair programming and to compare CodeLlama and GPT-4 using qualitative criteria and a small pass@1 pilot experiment.

**Formulation of the problem**. Traditional software development workflows often treat AI as a passive automation tool. In AI-assisted pair programming, however, the developer must allocate tasks, verify AI output, and manage coordination costs.

From an optimization perspective, the allocation of subtasks between the human developer and the AI assistant can be interpreted as a mathematical programming problem; in the simplified case of a linear objective function and linear constraints, it becomes a linear programming model that can be solved by the simplex method.

In parallel, game theory provides a complementary framework for describing strategic coordination between the human and AI agent, where trust, verification effort, and autonomy influence the final distribution of roles.

Therefore, the interaction can be represented as a constrained optimization problem.

To formalize the interaction between the human developer and the AI assistant in pair programming, the following optimization model can be introduced:

$$\max \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i H_i + \beta_i A_i) - \lambda C,$$

where $H_i$ denotes the human contribution to task i, $A_i$ denotes the AI contribution to task i, C represents the overall cognitive load, $\alpha_i$ and $\beta_i$ are effectiveness coefficients of human and AI participation, and $\lambda$ is the cognitive penalty coefficient.

The model is subject to the following resource-allocation constraint:

$$H_i + A_i \leq R_i, \forall i \in T,$$

where $R_i$ represents the available resources or effort limits for task i, and T denotes the set of development tasks.

Thus, the model represents AI-assisted pair programming as a trade-off between expected task performance and the cost of supervision, verification, and coordination.

In this study, the proposed optimization model is used as a conceptual formalization of role allocation, while the pilot experiment evaluates one measurable proxy of this interaction: first-attempt code correctness and the related need for human verification.

**Current Research and Frameworks**. These themes are explored in contemporary literature; for instance, Liu and Li (2024) describe educational applications of joint human-AI programming and the challenges associated with coordination and code quality (Deineha et al., 2025). Hassan et al. (2024) propose the transition from task-driven AI copilots to goal-driven AI pair programmers that actively collaborate by aligning with software goals and project-level constraints.

Game theory provides the overarching strategic framework required to model and understand the complex interactions between human developers and AI agents. By viewing this partnership through the lens of cooperative games, researchers can analyze how trust and commitment impact the final project outcomes.

The implementation of such a model in team development presents both advantages and challenges. While AI as a partner can increase productivity by handling routine or template-based work and reducing time spent on minor code fragments, it is necessary to ensure mechanisms for control, testing, and verification to maintain quality and avoid errors. Additionally, establishing a proper dialogue channel – characterized by clear queries, context preservation, and the ability to provide clarifications – is essential for effective AI pair programming.

**Comparative Analysis: CodeLlama vs. GPT-4**. To evaluate the effectiveness of AI in pair programming, the comparison of CodeLlama and GPT-4 was conducted at two levels: qualitative analysis of interaction styles and a small pilot experiment measuring first-attempt code correctness.

CodeLlama is distinguished by its high speed in generating standard, repetitive code fragments, making it ideal for routine template tasks where stability is prioritized over complex logic. Conversely, GPT-4 excels in multi-step, non-standard scenarios by maintaining logical consistency across large projects and proactively suggesting architectural alternatives through interactive dialogue. While CodeLlama may require greater verification effort due to the need for more rigorous manual checking and its weaker context retention during long sessions, GPT-4 may reduce this burden by producing more contextually consistent outputs in adaptive multi-step interactions. Ultimately, the choice between these models depends on task requirements: CodeLlama serves as a fast automation tool for simple scripts, whereas GPT-4 acts as a more flexible, proactive collaborator for sophisticated engineering challenges.

**Pilot Experimental Verification.** In this experiment, GPT-4 refers specifically to the GPT-4o model version used for code generation. To complement the qualitative comparison, a small empirical pilot experiment was conducted comparing CodeLlama and GPT-4 on 30 Python programming tasks. Ten tasks were selected from HumanEval (Chen et al., 2021), and twenty tasks were hand-authored to reflect everyday data-science work, including descriptive statistics, normalization, outlier detection, missing-value handling, classification metrics, train/test splitting, tokenization, similarity calculation, and group-by aggregation.

For each task, both models received the same prompt, consisting of the natural-language task description and the target function signature, and were instructed to return a single Python implementation. Generation was deterministic: GPT-4o was run with temperature = 0 (OpenAI, 2024), while CodeLlama-7b-Instruct-hf used greedy decoding (Rozière et al., 2023). The first

generated solution was extracted from any surrounding markdown, combined with the original signature, and executed against reference unit tests inside an isolated subprocess with a 5-second timeout. A task was counted as solved only if all assertions passed without raising an exception or timing out. The reported metric was pass@1, reflecting first-attempt correctness.

Table 1

**Pilot experimental results for CodeLlama and GPT-4o**

| Model | All tasks | HumanEval (10) | Data-science tasks (20) | pass@1 |
|---|---|---|---|---|
| GPT-4 (gpt-4o) | 29 / 30 | 10 / 10 | 19 / 20 | 0.97 |
| CodeLlama (CodeLlama-7b-Instruct-hf) | 23 / 30 | 10 / 10 | 13 / 20 | 0.77 |

*Source: compiled by the authors based on the pilot experiment.*

Both models solved all selected HumanEval tasks at the first attempt; the data-science subset accounted for all observed differentiation. GPT-4 achieved a higher pass@1 score, which indicates a smaller proportion of first-attempt solutions requiring human correction. This result supports the qualitative interpretation that, within the selected tasks, GPT-4 may reduce verification effort by producing a higher proportion of first-attempt correct solutions, while CodeLlama remains effective on standard tasks but more often requires developer revision before integration. Since the pilot experiment is intentionally small, based on 30 tasks, one metric, and one sample per task, the results should be interpreted as supportive quantitative evidence rather than as a definitive benchmark ranking.

**Conclusion**. The analysis shows that CodeLlama and GPT-4 are complementary in AI-assisted pair programming. CodeLlama is suitable for standard, clearly specified coding tasks, while GPT-4 performs better in adaptive data-science tasks in the pilot experiment. The difference in pass@1 scores suggests lower first-attempt correction effort for GPT-4, but the small sample size does not support broad benchmark claims. Therefore, model choice should depend on task complexity, required interactivity, and available human verification.

## References


1. Deineha, O., Arshava, O., & Zhovtonizhko, I. (2025). Evaluation of human and AI cooperation in pair programming on the example of CodeLlama and GPT-4. *Information Technologies and Computer Engineering*, *22*(2), 47–62. https://doi.org/10.31649/vitce/2.2025.47
2. Liu, J., & Li, S. (2024). Toward artificial intelligence-human paired programming: A review of the educational applications and research on artificial intelligence code-generation tools. *Journal of Educational Computing Research*, *62*(5), 1165–1195. https://doi.org/10.1177/07356331241240460
3. Chen, M., Tworek, J., Jun, H., Yuan, Q., Pinto, H. P. de O., Kaplan, J., Edwards, H., Burda, Y., Joseph, N., Brockman, G., Ray, A., Puri, R., Krueger, G., Petrov, M., Khlaaf, H., Sastry, G., Mishkin, P., Chan, B., Gray, S., ... Zaremba, W. (2021). Evaluating large language models trained on code. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03374
4. Hassan, A. E., Oliva, G. A., Lin, D., Chen, B., & Jiang, Z. M. (2024). *Rethinking software engineering in the foundation model era: From task-driven AI copilots to goal-driven AI pair programmers* (arXiv:2404.10225). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.10225
5. OpenAI. (2024). *GPT-4o system card* (arXiv:2410.21276). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.21276
6. Rozière, B., Gehring, J., Gloeckle, F., Sootla, S., Gat, I., Tan, X. E., Adi, Y., Liu, J., Sauvestre, R., Remez, T., Rapin, J., Kozhevnikov, A., Evtimov, I., Bitton, J., Bhatt, M., Canton Ferrer, C., Grattafiori, A., Xiong, W., Défossez, A., Copet, J., Azhar, F., Touvron, H., Martin, L., Usunier, N., Scialom, T., & Synnaeve, G. (2023). *Code Llama: Open foundation models for code* (arXiv:2308.12950). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.12950

# ПРО ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СТЕКУ WEB-ДОДАТКІВ НА ХМАРНІЙ ПЛАТФОРМІ

**Бурдаєв В.П.**
Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна

**Анотація.** У роботі розглядається кілька особливостей розробки розподіленої інтелектуальної системи для вибору стека наскрізного веб-додатку на хмарних платформах. Архітектура системи використовує як модель кінцевого автомата станів, так і API на платформі Telegram. Інтерфейс користувача реалізується у вигляді чат-бота. Чат-бот доступний в онлайн режимі 24/7 для навчання, тестування знань у галузі хмарних технологій. Для подання бази знань використано багатошарову структуру бази знань. Система показала свою високу ефективність (90%) під час підготовки студентів до екзамену з дисципліни: "Хмарні обчислення та їх використання".

**Ключові слова:** розподілена інтелектуальна система, база знань, логічний висновок, чат-бот Телеграм.

# ABOUT THE FEATURES OF DEVELOPING A DISTRIBUTED INTELLIGENT SYSTEM FOR CREATING A STACK OF WEB APPLICATIONS ON A CLOUD PLATFORM

**Burdaiev V.**
Institute of Computer Sciences and Information Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The paper considers several features of the development of a distributed intelligent system for selecting an end-to-end web application stack on cloud platforms. The system architecture uses both the state machine model and the API on the Telegram platform. The user interface is implemented in the form of a chatbot. The chatbot is available online 24/7 for training and testing knowledge in the field of cloud technologies. A multi-layered knowledge base structure was used to present the knowledge base. The system showed its high efficiency (90%) during the preparation of students for the exam in the discipline: "Cloud Computing and Its Uses".

**Keywords**: distributed intelligent system, knowledge base, logical inference, chatbot Telegram.

**Вступ.** Сучасний розвиток мережі Інтернет розглядає розподілені інтелектуальні системи як якісно нові технології, особливостями яких є моделювання функціональних систем і мультиагентний вибір адаптивної стратегії прийняття рішень. Розподілена інтелектуальна система характеризується тим, що база знань та механізми висновку розподілені по кількох вузлах, наприклад по серверах, сервісах та інших пристроях. Такі системи часто будуються з використанням підходів розподіленого штучного інтелекту та мультиагентних архітектур. Це дозволяє масштабувати інтелектуальні системи [1].

Парадигма створення розподілених інтелектуальних систем на основі використання чат-ботів набуває все більшої актуальності.

**Мета роботи** – аналіз розробки розподіленої інтелектуальної системи на платформі Telegram для онлайн-освітньої галузі.

**Постановка проблеми.** Поточна проблема для чат-ботів полягає у створенні механізму логічного висновку, який визначає релевантність знань для заданого питання. Тому широко використовуються різні інструменти прототипування, щоб показати клієнтам як буде виглядати та вести себе інтелектуальний чат-бот [2].

**Виклад основного матеріалу.** Розподілена інтелектуальна система DIS (Distributed Intelligent System) заснована на створенні мікросервісів мовою програмування PHP з використанням API на платформі Телеграм. Система використовує для інтерфейсу користувача можливості чат-бота на платформі Telegram.

В архітектурі DIS клієнт є Telegram-бот, а серверна логіка організована набором незалежних мікросервісів. Основні компоненти: Telegram Bot (UI), API Webhook-сервіс, сервіс логіки висновку (тут виконуватимуться правила, що реалізують прямий висновок), бази даних та знань, служба кінцевого автомата (який керує станом діалогу з користувачем).

Зв'язки між компонентами: бот надсилає повідомлення через HTTPS-запити (Webhook) сервісу API, який у свою чергу робить запити до потрібних мікросервісів. Мікросервіси у відповідь звертаються до бази даних та бази знань, а також повертають результат API, який пересилає відповідь назад боту.

Переваги використання детермінованого кінцевого автомата станів у тому, що спрощується логіка діалогу з користувачем і розширюється функціональність чат-бота. Наприклад, стан {Expert system (for web stack)} призначений для онлайн консультації користувачів чат бота. Цей стан дозволяє вибирати технологічний веб-стек для веб-додатку на підставі знань експерта. Для цього використовуються такі стани: {Web stack (13)}, {Result}, {Home}. Стан {Web stack (13)} дозволяє задати користувачеві 13 питань для визначення фактів щодо вибору технологічного стека наскрізного веб-додатку. Стан {Result} дозволяє користувачеві проаналізувати у будь-який момент консультації наступне: як було утворено факт бази знань і які правила бази знань були використані для отримання результату консультації.

Сценарій взаємодії користувача з чат-ботом з використанням API виглядає таким чином: користувач надсилає запит (наприклад, /start або натискання кнопки чат-бота) в API; контролер CommanderController отримує повідомлення і відповідно до логіки функції getTelegramRoutes з файлу config.php викликається метод для обробки бізнес-логіки бази знань.

Для розподіленої інтелектуальної системи DIS (@it_esbvp_bot) створено базу знань для вибору стека веб-додатку на хмарній платформі. База знань містить багатошарову структуру та понад 100 правил, які дозволяють сформувати стек веб-додатку на хмарних платформах: Microsoft (Azure), Oracle/IBM, Amazon (AWS), Google (GCP).

Для формування стека web-додатка треба використати наступні шари бази знань: cloud platform, cloud technologies, cloud scope of application, cloud development budget, cloud CI/CD, cloud DB, cloud frontend, cloud backend, cloud container, cloud services, cloud community, cloud security, cloud mobil.

Перша особливість розробки системи DIS полягала в тому, що база знань розроблена за допомогою візуального редактора оболонки KARKAS. Ця база знань має багатошарову структуру [2].

Друга особливість полягає у використанні кінцевого автомата для бізнес-логіки і PHP для створення мікросервісів з використанням API на платформі Телеграм.

Третя особливість полягає в тому, що для інтерфейсу користувача використовувався інтерфейс чат-бота Телеграм.

**Висновки.** Внаслідок аналізу розробки розподіленої інтелектуальної системи на платформі Телеграм було встановлено: система DIS заснована на API і використовує багатошарову базу знань. Вона дозволила організувати індивідуальне тестування та активно підготувати студентів до іспитів. Підвищився процент засвоєння знань студентами в процесі роботи з системою DIS, а також при захисті лабораторних робіт по тематиці хмарні технології.

## Список використаних джерел


1. Janbi N., Katib I., Mehmood R.: Distributed artifcial intelligence: Taxonomy, review, framework, and reference architecture / N. Janbi, I. Katib, R. Mehmood //Intelligent Systems with Applications, 18, (2023), https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200231.
2. Burdaev V.: Features of intelligent systems development for platforms Telegram and Android / V.P. Burdaev //Information Technology for Education, Science, and Technology, In: Faure E., et al.. ITEST 2024. 156-171, (2024), https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_11.

# ФОРМУВАННЯ СЛОВНИКА ОЗНАК ДЛЯ АТРИБУЦІЇ АВТОРСТВА ПРОГРАМНИХ КОДІВ

**Голуб С.В., Немов Р.Г.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто задачу визначення авторства (атрибуції) програмних кодів. Актуальності цій роботі надає використання генеративних моделей штучного інтелекту (ШІ) для написання коду програм та необхідність їх тестування. Треба розрізнити код програміста від коду, згенерованого моделлю ШІ. Існуючі підходи до атрибуції коду переважно спираються на синтаксичні ознаки конкретної мови програмування і тому не переносяться між мовами. Як альтернативу застосовано методологію формування масиву вхідних даних (МВД) школи С.В. Голуба, розроблену для класифікації україномовних текстів, з ймовірнісним критерієм інформативності та межею інформативної достатності (МІД). Метою роботи є розробка нового типу ознак – символьних крос-зв'язків між словами, що характеризують парні комбінації суфіксів і префіксів ідентифікаторів коду в межах вікна, та експериментальна перевірка ефективності методу. Запропоновано двопоказникове оцінювання за кількістю правильно класифікованих об'єктів найкращої моделі та середньою кількістю правильно класифікованих об'єктів усіх моделей турніру, що дає надійнішу оцінку інформативності МВД. Експериментально на датасеті з 12 авторів (10 людей та 2 моделі ШІ) у 4 мовах програмування досліджено 18 серій у двох сценаріях: крос-мовний (10 серій) та розрізнення Людина / ШІ (8 серій). Показано, що крос-зв'язки забезпечують середній відносний приріст кількості правильно класифікованих об'єктів за класами на +6,63% на усереднених показниках турніру моделей.

**Ключові слова:** атрибуція авторства коду, виявлення коду генеративного ШІ, символьні крос-зв'язки, інтелектуальний моніторинг, машинне навчання, МГУА.

# FORMATION OF FEATURE DICTIONARY FOR SOURCE CODE AUTHORSHIP ATTRIBUTION

**Holub S., Nemov R.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses the task of source code authorship attribution. The relevance of this work stems from the use of generative artificial intelligence (AI) models for writing program code and the need to test them. It is necessary to distinguish a programmer's code from code generated by an AI model. Existing approaches to code attribution mostly rely on syntactic features of a particular programming language and therefore do not transfer between languages. As an alternative, the methodology of input data array (IDA) formation of S.V. Holub's school, developed for the classification of Ukrainian-language texts, has been adopted, with a probabilistic informativeness criterion and a threshold of informational sufficiency (TIS). The aim of the work is to develop a new type of features – symbolic cross-links between words, which characterise paired combinations of suffixes and prefixes of code identifiers within a window, and to experimentally verify the effectiveness of the method. A two-indicator evaluation is proposed, based on the number of correctly classified objects by the best model and the average number of correctly classified objects across all tournament models, which provides a more reliable estimate of IDA informativeness. Experimentally, on a dataset of 12 authors (10 humans and 2 AI models) in 4 programming languages, 18 series were investigated in two scenarios: cross-language (10 series) and Human/AI discrimination (8 series). It is shown that cross-links provide an average relative gain in the number of correctly classified objects by classes of +6.63% on the averaged tournament indicators.

**Keywords:** source code authorship attribution, generative AI code detection, symbolic cross-links, intelligent monitoring, machine learning, GMDH.

**Вступ.** Стрімкий розвиток генеративних моделей штучного інтелекту – ChatGPT, Claude Code – поставив нову задачу автоматичного розрізнення коду людини від коду, згенерованого моделлю ШІ. Ця задача актуальна для виявлення плагіату в академічному середовищі [7], судової програмно-технічної експертизи та аналізу загроз в екосистемах

відкритого коду. Класичні підходи до атрибуції коду спираються на синтаксичні ознаки конкретної мови програмування – абстрактні синтаксичні дерева, лексичні токени та структурні характеристики [4, 5]; точність такого підходу досягає 95% при 1600 авторах [4]. Сучасні роботи використовують глибокі нейронні мережі та робастні методи атрибуції [6], а також спеціалізовані детектори коду, згенерованого великими мовними моделями [8, 9]. Однак ці підходи залишаються мовно-залежними, тоді як реальні автори часто пишуть код різними мовами, що мотивує пошук мовно-незалежних ознак.

**Мета роботи.** Метою роботи є подальший розвиток символьних крос-зв'язків між словами, які розширюють словник ознак методології школи С.В. Голуба [1, 2] та запропоновані в попередній роботі авторів [3], а також експериментальна перевірка ефективності методу у крос-мовному сценарії та сценарії розрізнення людських і машинно-згенерованих кодів.

**Постановка задачі.** Дано скінченну множину програмних кодів

$$T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\} \quad (1)$$

експертно згруповану за авторством у $m$ класів множини $K$:

$$K = \{k_1, k_2, \ldots, k_m\}, \quad (2)$$

де $m$ – кількість авторів. Необхідно побудувати модель-класифікатор $f$, що відображає елементи нової множини $T^*$ (нових кодів після навчання) на елементи множини $K$:

$$f: T^* \to K. \quad (3)$$

Властивості моделі залежать від вектора ознак МВД $x$ (обчислюваних у вікнах фіксованої довжини), вектора довжин вікон $l$ та вектора алгоритмів синтезу моделей $\varphi$:

$$f = f(x, l, \varphi). \quad (4)$$

**Вирішення проблеми.** Запропоновано розширити словник ознак методології школи С. В. Голуба новим типом ознак – символьними крос-зв'язками, що характеризують парні комбінації суфіксів та префіксів ідентифікаторів коду в межах вікна фіксованої довжини [3]. Особливістю запропонованих ознак, на відміну від синтаксичних ознак [4, 5] та embedding-моделей CodeBERT-типу [8], є мовна незалежність та використання всіх упорядкованих пар слів у вікні, що робить ознаки нечутливими до локальних переставлень коду. Фільтрація ознак виконується за ймовірнісним критерієм інформативності з межею інформативної достатності (МІД).

Введено двопоказникове оцінювання ефективності методу: кількість правильно класифікованих об’єктів найкращою моделлю турніру характеризує верхню межу досяжного на даному МВД, а середня кількість правильно класифікованих об’єктів усіма моделями турніру – інформативність самого МВД незалежно від вибору архітектури. Перевага методу обчислюється як відносний приріст кількості правильно класифікованих об’єктів з крос-зв'язками порівняно з варіантом без них, окремо для рівнів вікон і класів.

Експериментальне дослідження виконано на датасеті з 12 авторів (10 людей та 2 моделі ШІ – ChatGPT і Claude Code) у 4 мовах програмування. Параметри МВД: N = 500 знаків, T = 5%, режим AVG. У турнірі понад 40 архітектур нейронних мереж разом з МГУА. Виконано 18 серій. Усереднені результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Усереднені переваги методу за сценаріями (P, %)**

| **Сценарій** | **Серій** | **P_вікна,avg** | **P_класи,best** | **P_класи,avg** |
|---|---|---|---|---|
| Крос-мовний (Java, JS, TS, Python) | 10 | −0,74 | −0,06 | +1,02 |
| Розрізнення Людина / ШІ | 8 | +2,83 | −4,17 | +7,05 |
| Усього | 18 | +0,86 | −1,89 | +3,71 |

У крос-мовному сценарії 10 «своїх» авторів пишуть на Java, JavaScript, TypeScript та Python. Базовий варіант уже забезпечує 92–96% правильно класифікованих об’єктів за

усередненими показниками, тому відносний приріст від додавання крос-зв'язків незначний ($P_{класи,avg}$ = +1,02%) – спостерігається ефект насичення.

У сценарії розрізнення Людина / ШІ виконано 8 серій, в яких «своїми» послідовно виступали ChatGPT, Claude Code та люди-Java-розробники, а «чужими» – представники протилежного класу. Запропонований метод забезпечив середній відносний приріст кількості правильно класифікованих об’єктів за класами на +7,05% (у серіях 6.1, 6.2, 6.4 – до +14...+25%). Розмір адаптивного словника при додаванні крос-зв'язків зростає у 2,5–7,1 рази, що узгоджується з результатами [3] для внутрішньомовного сценарію. На відміну від існуючих детекторів AI-коду [8, 9], запропонований метод забезпечує мовно-незалежне виявлення авторства. Двопоказникове оцінювання дозволило виявити серії, в яких кількість правильно класифікованих об’єктів найкращою моделлю знижується, тоді як середня кількість правильно класифікованих об’єктів по турніру зростає.

**Висновок.** Запропоновано двопоказникове оцінювання ефективності символьних крос-зв'язків [3] для класифікації авторства програмних кодів. Виявлено, що крос-зв'язки покращують якість МВД (середній відносний приріст кількості правильно класифікованих об’єктів за класами +6,63% по 18 серіях), а не лише сприяють вдалому вибору архітектури. Найбільший ефект – у задачі мовно-незалежного розрізнення людських і машинно-згенерованих кодів. Перспектива – оптимізація МВД та поєднання крос-зв'язків з embedding-методами CodeBERT-типу [8].

## Список використаних джерел


1. Голуб М.С. (2018). Формування масиву вхідних даних при класифікації текстів у технології інформаційного моніторингу. Математичні машини і системи. № 1, С. 59–66.
2. Голуб М.С. (2018). Формування масиву чисельних ознак для класифікації україномовних текстів в інформаційній технології інтелектуального моніторингу: дис. канд. техн. наук: 05.13.06. Черкаський державний технологічний університет, 137 с.
3. Голуб С.В., Немов Р.Г. (2026). Формування масиву чисельних ознак для класифікації авторства програмних кодів із використанням символьних крос-зв'язків між словами. Математичні машини і системи. № 2, С. 70–78. https://doi.org/10.34121/1028-9763-2026-2-70-78.
4. Caliskan-Islam A., Harang R., Liu A., Narayanan A., Voss C., Yamaguchi F., Greenstadt R. (2015). De-anonymizing Programmers via Code Stylometry. Proceedings of the 24th USENIX Security Symposium. USENIX Association, pp. 255–270.
5. Abuhamad M., AbuHmed T., Mohaisen A., Nyang D. (2018). Large-scale and language-oblivious code authorship identification. Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 101–114. https://doi.org/10.1145/3243734.3243738.
6. Li Z., Chen G., Chen C., Zou Y., Xu S. (2022). RoPGen: Towards Robust Code Authorship Attribution via Automatic Coding Style Transformation. ICSE '22. ACM, pp. 1906–1918. https://doi.org/10.1145/3510003.3510181.
7. Pan W.H., Chok M.J., Wong J.L.S., Shin Y.X., Poon Y.S., Yang Z., Chong C.Y., Lo D., Lim M.K. (2024). Assessing AI Detectors in Identifying AI-Generated Code: Implications for Education. ICSE-SEET '24. ACM, pp. 1–11. https://doi.org/10.1145/3639474.3640068.
8. Nguyen P.T., Di Rocco J., Di Sipio C., Rubei R., Di Ruscio D., Di Penta M. (2024). GPTSniffer: A CodeBERT-based classifier to detect source code written by ChatGPT. Journal of Systems and Software, vol. 214, 112059. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112059.
9. Oedingen M., Engelhardt R.C., Denz R., Hammer M., Konen W. (2024). ChatGPT Code Detection: Techniques for Uncovering the Source of Code. AI, 5(3), 1066–1094. https://doi.org/10.3390/ai5030053.

# ВЕБОРІЄНТОВАНА СИСТЕМА ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ З УРАХУВАННЯМ ДОРОЖНЬОГО ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ГРАФОВИХ АЛГОРИТМІВ І НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

**Дзюба В.А., Рябоконь І.Ю.**
[1]Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі представлено веборієнтовану інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень для водіїв, яка забезпечує побудову оптимальних маршрутів на основі графової моделі дорожньої мережі. Система реалізує три алгоритми маршрутизації – алгоритм Дейкстри, A* та ML-алгоритм на основі графової нейронної мережі (GNN), навченої на реальних даних дорожньої мережі міста Києва. Для врахування дорожнього трафіку в реальному часі інтегровано зовнішнє джерело даних про трафік з візуалізацією теплової карти завантаженості доріг. Система забезпечує відстеження переміщення водія в реальному часі та автоматичну перебудову маршруту у випадку відхилення.

**Ключові слова:** інтелектуальна система підтримки рішень водіїв, алгоритм пошуку найкоротшого шляху, дорожній трафік, маршрутизація, графова модель дорожньої мережі, графова нейронна мережа, навігаційна система.

# WEB-ORIENTED ROUTE PLANNING SYSTEM CONSIDERING ROAD TRAFFIC BASED ON GRAPH ALGORITHMS AND NEURAL NETWORKS

**Dziuba V.A., Riabokon I.Y.**
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper presents a web-oriented intelligent decision support system for drivers that provides optimal route construction based on a graph model of the road network. The system implements three routing algorithms – Dijkstra's algorithm, A* and an ML-algorithm based on a graph neural network (GNN) trained on real road network data of the city of Kyiv. To account for real-time road traffic, an external traffic data source has been integrated with visualization of a road congestion heatmap. The system provides real-time driver tracking and automatic route recalculation in case of deviation.

**Keywords:** intelligent decision support system for drivers, shortest path search algorithm, road traffic, routing, graph model of road network, graph neural network, navigation system.

**Вступ.** Стрімке зростання кількості транспортних засобів у великих містах призводять до систематичного перевантаження дорожньої інфраструктури, збільшення часу подорожі та підвищення рівня аварійності. За таких умов зростає потреба в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень, здатних допомогти водію обрати оптимальний маршрут із урахуванням динамічних факторів дорожнього трафіку.

На сьогодні існує низка популярних навігаційних сервісів – Google Maps, Waze, HERE WeGo, – які широко використовуються водіями для щоденної навігації. Google Maps надає розрахунок маршрутів на основі власних даних про трафік, проте не дозволяє користувачу обирати алгоритм маршрутизації чи впливати на логіку побудови шляху [1]. Waze орієнтований на краудсорсингову модель збору даних про дорожню обстановку, однак маршрутизація залишається непрозорою для кінцевого користувача. HERE WeGo пропонує офлайн-навігацію та власний рушій маршрутизації. Спільним недоліком цих рішень є відсутність можливості порівнювати результати різних алгоритмів пошуку шляху, а також нездатність автоматично адаптувати маршрут на основі аналізу типу доріг, часових характеристик (година пік, вихідні) та поточного стану завантаженості ділянок.

Постає необхідність розробити веборієнтовану інтелектуальну систему, яка дозволяє будувати оптимальні маршрути з урахуванням дорожнього трафіку в реальному часі, надає водію можливість обирати між класичними алгоритмами пошуку на графах (Дейкстра [2], A* [3]) та алгоритмом на основі графової нейронної мережі [1, 4], а також відстежує переміщення користувача та динамічно перебудовує маршрут у випадку відхилення.

**Мета роботи**: розробка веборієнтованої інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для водіїв, яка поєднує класичні алгоритми пошуку найкоротшого шляху на графах

(алгоритм Дейкстри та A*) із графовою нейронною мережею (GNN) для побудови оптимальних маршрутів з урахуванням дорожнього трафіку в реальному часі.

**Архітектура системи.** Система побудована за клієнт-серверною архітектурою (рис. 1). Frontend реалізовано на Vue.js 3 з використанням TypeScript, бібліотеки MapLibre GL для візуалізації картографічних даних та фреймворку Tailwind CSS для стилізації інтерфейсу. Для управління станом застосунку використовується бібліотека Pinia, а взаємодія з серверним API здійснюється через HTTP-клієнт Axios з автоматичним оновленням JWT-токенів авторизації. Застосунок підтримує інтернаціоналізацію (українська та англійська мови) засобами бібліотеки Vue I18n.

Backend реалізовано на FastAPI (Python), асинхронному фреймворку, що забезпечує високу продуктивність обробки запитів завдяки ASGI-серверу Uvicorn. Автентифікація користувачів реалізована на основі JWT-токенів із механізмом оновлення сесії, а паролі зберігаються у хешованому вигляді за алгоритмом Argon2. Серверна частина надає REST API для операцій з маршрутами, геокодування, управління обліковими записами користувачів, збереження історії поїздок та обраних локацій.

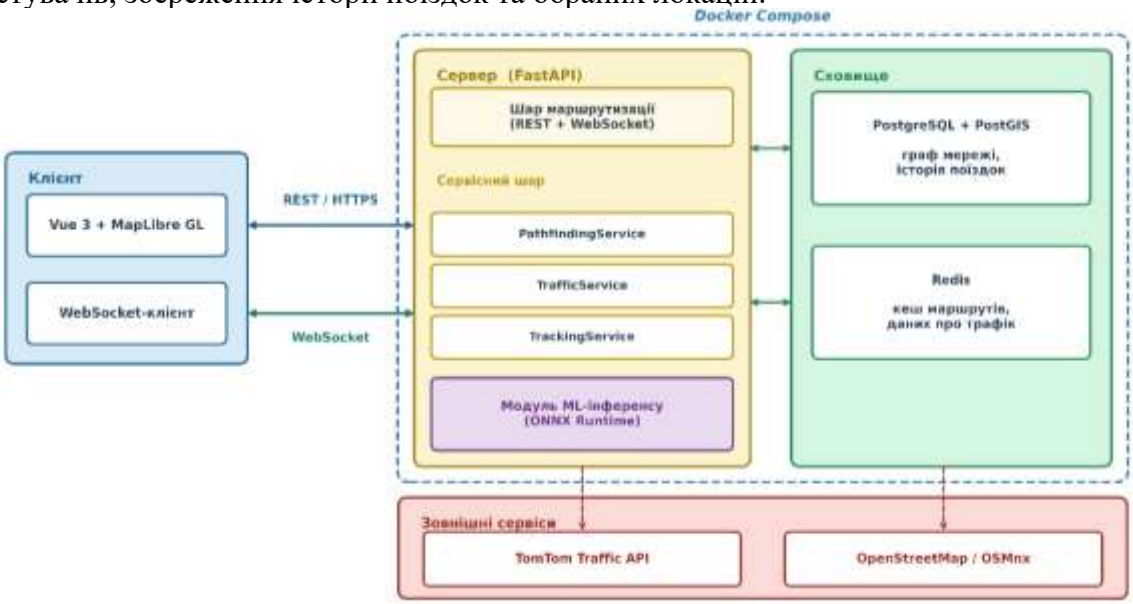



Рис. 1. Структурна схема веборієнтованої системи підтримки рішень для водіїв

**Методи та алгоритми.** Дорожня мережа міста представлена у вигляді зваженого орієнтованого графа, де вершини відповідають перехрестям, а ребра – дорожнім сегментам. Кожне ребро характеризується атрибутами: відстань (км), обмеження швидкості (км/год), тип дороги (motorway, primary, secondary, tertiary, residential тощо) та ознака односторонності. Імпорт даних здійснюється з OpenStreetMap за допомогою бібліотеки OSMnx [1].

У системі реалізовано три алгоритми побудови маршруту з можливістю вибору користувачем. Перший – алгоритм Дейкстри [2], класичний алгоритм пошуку найкоротшого шляху зі складністю O((V+E) log V). Другий – алгоритм A* [3], евристичний алгоритм, що використовує гаверсинусову відстань (обчислює найкоротшу відстань між двома точками на поверхні сфери за їхніми географічними координатами) як евристику для прискорення пошуку цільового вузла. Процес роботи алгоритмів Дейкстри та A* наведено на рис. 2. Третій – ML-алгоритм на основі графової нейронної мережі (GNN), який оцінює вагові коефіцієнти ребер із урахуванням поточних умов руху та передає їх алгоритму Дейкстри для знаходження оптимального шляху [5].

Третій алгоритм базується на моделі GNN, навченій на реальних даних дорожньої мережі міста Києва засобами бібліотек PyTorch та PyTorch Geometric. На вхід моделі подаються ознаки вузлів графа (нормалізовані координати, ступені зв'язності вершин), ознаки ребер (відстань, обмеження швидкості, односторонність, тип дороги у вигляді one-hot кодування), а також темпоральні параметри – година доби, день тижня, ознака години пік та вихідного дня. На основі цих даних модель прогнозує оптимальні вагові коефіцієнти для кожного ребра графа, що дозволяє враховувати не лише фізичну відстань, а й очікувані

умови руху на конкретній ділянці у заданий момент часу. Для розгортання у продакшн-середовищі навчена модель експортується у формат ONNX, що забезпечує ефективне виконання прогнозів на сервері без залежності від PyTorch.

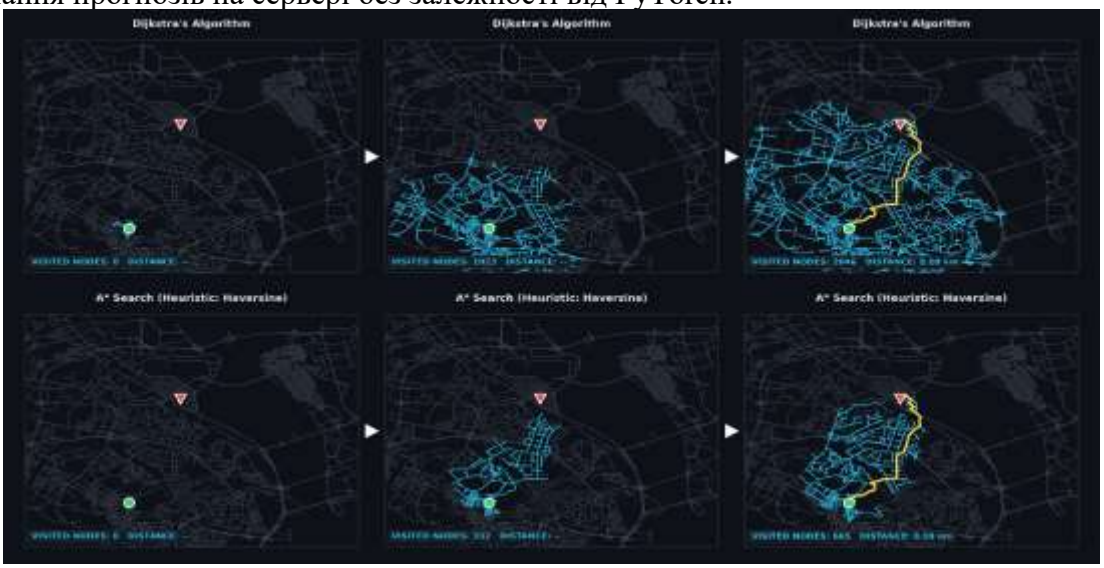



Рис. 2. Візуалізація роботи алгоритмів Дейкстри та A* з гаверсинусовою евристикою на фрагменті дорожньої мережі м. Києва

Для отримання актуальних даних про дорожній трафік інтегровано TomTom Traffic API. Сервіс трафіку обчислює коефіцієнт швидкості (відношення поточної швидкості до швидкості вільного потоку), що використовується для динамічного коригування ваг ребер графа. На основі отриманих даних формується теплова карта завантаженості доріг, що візуалізує рівень трафіку на ділянках маршруту в реальному часі. Система підтримує генерацію альтернативних маршрутів (до 3 варіантів) з порівнянням відстані та розрахункового часу подорожі.

**Відстеження та динамічна перебудова маршруту.** Під час навігації система відстежує переміщення водія в реальному часі через WebSocket-з'єднання, що забезпечує безперервну передачу GPS-координат від клієнта до сервера з пакетним збереженням точок у базі даних. Для кожної отриманої точки фіксуються координати, точність визначення позиції та поточна швидкість руху. Система реалізує механізм детекції відхилення від запланованого маршруту – якщо відстань між поточним місцезнаходженням водія та найближчою точкою маршруту перевищує встановлений поріг, автоматично ініціюється перебудова маршруту від поточної позиції до кінцевого пункту призначення із збереженням обраного алгоритму маршрутизації.

**Висновки.** Розроблена веборієнтована інтелектуальна система підтримки прийняття рішень поєднує класичні алгоритми пошуку на графах із графовою нейронною мережею для побудови оптимальних маршрутів з урахуванням дорожнього трафіку в реальному часі. Клієнт-серверна архітектура та контейнеризація забезпечує масштабованість та незалежність розгортання компонентів. Подальший розвиток системи передбачає розширення набору навчальних даних для моделі GNN, інтеграцію додаткових джерел інформації про дорожні умови та впровадження персоналізованих рекомендацій на основі історії маршрутів користувача.

## Список використаних джерел


1. Amit Sharma, Ashutosh Sharma, P. Nikashina, V.Gavrilenko: A Graph Neural Network (GNN)-Based Approach for Real-Time Estimation of Traffic Speed in Sustainable Smart Cities (2023)
2. Dijkstra E . A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik. (1959)
3. Hart P., Nilsson N., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 100–107 (1968).
4. Jiang, W., & Luo, J. (2022). Graph neural network for traffic forecasting: A survey. *Expert systems with applications*, *207*, 117921.
5. Li, H., Zhao, Y., Mao, Z., Qin, Y., Xiao, Z., Feng, J., Zhang, M. (2024). Graph neural networks in intelligent transportation systems: Advances, applications and trends. *arXiv preprint arXiv:2401.00713*.

# РОЗРОБКА ІНТЕРАКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Дігтяренко Н.О., Красношлик Н.О., Сердюк О.А.**
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

**Анотація**. В матеріалах роботи наводяться результати розробки програмного застосунку для візуального конструювання конвеєрів машинного навчання без необхідності написання коду. Метою роботи є реалізація програми з графічним візуальним інтерфейсом для візуального програмування конвеєрів обробки даних та навчання моделей машинного навчання. Основним завданням роботи є розробка архітектури на основі вузлового редактора, реалізація модулів для підготовки, очищення та трансформації наборів даних, інтеграція алгоритмів класифікації та засобів оцінки їх ефективності, а також створення системи серіалізації графів обчислень для збереження поточного стану конвеєра. Об’єктом дослідження є процес створення застосунка для візуального програмування. Предмет дослідження – архітектура, алгоритми та програмні інструменти створення вузлового графічного інтерфейсу для побудови та автоматизації конвеєрів машинного навчання. Проведено проєктування інтерактивного середовища із застосуванням фреймворку Dear PyGui, створено базовий абстрактний клас для інкапсуляції логіки роботи графічних блоків та реалізовано рекурсивний алгоритм обчислення послідовності виконання графа з урахуванням усіх залежностей.

**Ключові слова**: візуальне програмування, машинне навчання, вузловий редактор, конвеєр обробки даних, обчислювальний граф.

# DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE ENVIRONMENT FOR VISUALIZING THE MACHINE LEARNING PROBLEM-SOLVING PROCESS

**Dihtiarenko N., Krasnoshlyk N., Serdiuk O.**
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This paper presents the results of developing a no-code software application for the visual construction of machine learning pipelines. The objective of this work is to implement an application with a graphical user interface for the visual programming of data processing pipelines and the training of machine learning models. The primary tasks of this work include developing a node editor-based architecture, implementing modules for dataset preparation, cleaning, and transformation, integrating classification algorithms and tools for evaluating their performance, and creating a computational graph serialization system to save the current state of the pipeline. The object of the study is the development process of a visual programming application. The subject of the study encompasses the architecture, algorithms, and software tools used to create a node-based graphical interface for building and automating machine learning pipelines. An interactive environment was designed using the Dear PyGui framework, a base abstract class was created to encapsulate the operational logic of the graphical blocks, and a recursive algorithm was implemented to calculate the graph's execution sequence while accounting for all dependencies.

**Keywords**: visual programming, machine learning, node editor, data processing pipeline, computational graph.

**Вступ**. Стрімкий розвиток штучного інтелекту та машинного навчання докорінно змінив підходи до аналізу даних у науці, бізнесі та освіті, через що зростає потреба у відповідних фахівцях [1-2]. Водночас процес розробки ефективних моделей машинного навчання залишається технічно складним і потребує впевненого володіння мовами програмування, математичною статистикою та спеціалізованими бібліотеками. Цей високий поріг входження суттєво обмежує залучення фахівців із суміжних галузей, дослідників і студентів, які мають необхідні предметні знання, проте не мають глибокої інженерної підготовки.

Розробка інтерактивних середовищ на базі вузлів, які дозволяють конструювати конвеєри для задач машинного навчання без необхідності написання коду є досить актуальним завданням. Створення таких інструментів дозволяє значно пришвидшити

процеси прототипування та тестування аналітичних гіпотез у сучасних інформаційних системах.

Попри наявність зрілих платформ на кшталт KNIME [3], Orange Data Mining [4], RapidMiner (Altair AI Studio) [5], у навчальних і прототипувальних сценаріях зберігається потреба в легковагових локальних середовищах, які поєднують простоту інтерфейсу, модульність та розширюваність.

**Мета роботи**. Метою роботи є проєктування та програмна реалізація інтерактивного середовища на базі вузлів для візуалізації та автоматизації етапів процесу розв'язання задач машинного навчання. Поєднання вузлового інтерфейсу, модульної архітектури виконання графа та серіалізації стану конвеєра забезпечує достатній рівень прозорості, розширюваності і практичної відтворюваності для навчального та прототипувального використання даної системи.

**Постановка задачі**. Класичний процес розробки конвеєрів машинного навчання вимагає написання значного обсягу програмного коду для завантаження, перетворення даних, тренування моделей та візуалізації результатів. Це ускладнює етап швидкого прототипування та знижує наочність проміжних перетворень наборів даних. Відповідно, виникає необхідність абстрагування програмної логіки у вигляді візуальних блоків. З огляду на це, постановка задачі даної роботи полягає у розробці архітектури інтерактивного вузлового середовища, де етапи обробки даних представлені як орієнтований граф. Необхідно спроєктувати механізми динамічної передачі даних між вузлами з контролем сумісності типів, реалізувати алгоритм послідовного обчислення графа та забезпечити можливість збереження топології побудованої мережі.

**Вирішення проблеми**. Для вирішення поставленої задачі було спроєктовано гнучку та масштабовану модульну архітектуру застосунку з використанням мови програмування Python. Розробку здійснено на базі кросплатформного фреймворку Dear PyGui [6], який використовує апаратно-прискорений рендеринг та забезпечує ефективну роботу графічного інтерфейсу при побудові складних графів обчислень. Програмне ядро системи спирається на бібліотеки pandas для маніпуляції табличними даними та scikit-learn [7-8] для реалізації алгоритмів машинного навчання.

Центральною обчислювальною абстракцією системи є орієнтований ациклічний граф, у якому вершини є функціональними вузлами, а орієнтовані ребра – типізованими каналами передачі даних. Ребро між двома вузлами може бути встановлено лише тоді, коли тип вихідного піна збігається з типом вхідного, що забезпечує структурну безпеку типів на етапі конструювання конвеєра, а не під час виконання.

Основою модульної архітектури розробленого середовища є базовий клас Node, описаний у системному файлі base.py. Він виступає універсальним абстрактним шаблоном, який інкапсулює загальну логіку роботи графічного блоку. Усі специфічні вузли системи, як для обробки даних, так і для машинного навчання, успадковуються від цього батьківського класу, що забезпечує єдиний стандарт взаємодії компонентів та значно спрощує розширення функціоналу.

Візуальне представлення кожного блоку формується за допомогою методу design(), в якому описується зовнішній вигляд вузла з використанням інструментів фреймворку Dear PyGui. Логіка обчислень та операції над даними реалізовані у методі calculate(). Цей метод є математичним ядром вузла, яке запускається лише тоді, коли блок отримує всі необхідні вхідні параметри. Результат виконання цього методу кешується та передається на вихідний порт для подальшого використання у конвеєрі.

Важливою архітектурною особливістю є механізм динамічного завантаження модулів через бібліотеку importlib. Програма на етапі ініціалізації сканує директорії, реєструючи класи вузлів, що дозволяє розширювати функціонал новими інструментами без втручання в основне ядро системи та дотримуватись принципу відкритості/закритості.

Механізм виконання графа побудований на рекурсивному обчисленні залежностей за допомогою методу get_value(). Якщо вузол потребує вхідних даних, ініціюється звернення

до підключеного попереднього блоку, що автоматично запускає його метод calculate(), забезпечуючи строгу послідовність виконання потоку. Для підвищення безпеки виконання реалізована система типізації з'єднань, яка валідує сумісність вихідних та вхідних портів, мінімізуючи логічні помилки під час конструювання.

Система містить повний набір інструментів для життєвого циклу машинного навчання:

1. Підготовка даних: завантаження файлів CSV, фільтрація, видалення ознак, масштабування, кодування категорій та імп'ютація пропусків, у тому числі за допомогою алгоритму k-найближчих сусідів.
2. Моделювання: вузли для ініціалізації таких класифікаторів, як дерево рішень, випадковий ліс, k-найближчих сусідів та гістограмний градієнтний бустинг з можливістю налаштування гіперпараметрів через інтерфейс.
3. Навчання та оцінка: модулі поділу вибірки, навчання, генерації прогнозів та обчислення метрик з візуалізацією матриць кореляції та невідповідностей у вигляді теплових карт.

Для забезпечення відтворюваності експериментів та зручності роботи з конвеєрами машинного навчання було реалізовано механізм збереження і відновлення стану робочого простору. Цей процес базується на збереженні топології графа обчислень у текстовий формат JSON. При ініціалізації процесу збереження алгоритм послідовно обходить усі активні вузли на полотні редактора та збирає інформацію про їх поточний стан для подальшого збереження у структурований словник даних.

**Висновок**. Було спроєктовано та програмно реалізовано інтерактивне середовище для візуального конструювання конвеєрів машинного навчання. Отримані результати підтверджують високу ефективність вузлового підходу. Завдяки графічному інтерфейсу та механізмам валідації з'єднань вдалося суттєво знизити поріг входження для спеціалістів-початківців, звільнивши їх від необхідності написання програмного коду.

Експериментальна перевірка на задачі бінарної класифікації бенчмарку Титанік підтвердила коректність системи: результати (Accuracy 0.8045, F1-Score 0.8038) повністю відтворюють показники аналогічного конвеєра, реалізованого нативним кодом Python із використанням pandas та scikit-learn.

Практична цінність розробленої системи полягає у спрощенні процесів підготовки вибірок, можливості швидкого тестування різних класифікаторів та наочному контролі трансформацій даних на кожному етапі. Гнучка об'єктно-орієнтована архітектура з динамічним завантаженням компонентів створює надійне підґрунтя для масштабування проєкту. Перспективними напрямами подальшого розвитку є розширення бази вузлів методами регресії та кластеризації, впровадження алгоритмів автоматичного підбору гіперпараметрів, а також реалізація механізму компіляції та експорту розробленого візуального графа у готовий Python-скрипт для розгортання у промислових середовищах.

## Список використаних джерел


1. Green A., Lamby E. Artificial Intelligence and the Changing Demand for Skills in the Labour Market. Paris : OECD Publishing, 2024.
2. Bone M., Ehlinger E., Stephany F. Skills or Degree? The Rise of Skill-Based Hiring for AI and Green Jobs. arXiv preprint arXiv:2312.11942, 2023.
3. Офіційний сайт аналітичної платформи KNIME. URL: https://www.knime.com/ (дата звернення: 18.04.2026).
4. Офіційний сайт платформи Orange data mining. Orange Data Mining. URL: https://orangedatamining.com/ (дата звернення: 18.04.2026).
5. Офіційний сайт платформи RapidMiner. Data Analytics and AI Platform | Altair RapidMiner. URL: https://altair.com/altair-rapidminer/ (дата звернення: 18.04.2026).
6. Офіційна документація Dear PyGui. Dear PyGui's Documentation – Dear PyGui documentation. URL: https://dearpygui.readthedocs.io/ (дата звернення: 18.04.2026)
7. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. 3rd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2022. 851 p.
8. Raschka S., Patterson J., Nolet C. Machine Learning in Python: Main Developments and Technology Trends in Data Science, Machine Learning, and Artificial Intelligence. arXiv:2002.04803, 2020.

# СЕГМЕНТАЦІЯ ТРІЩИН БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ТА ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

**Карапетян А.Р.[1], Федоров Є.Є. [1], Смоляр А.М. [1], Мірошкіна І.В. [1], Аль-Шайх Я.Д.[2]**
[1]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2]Університет Зарка, Зарка, Йорданія

**Анотація.** У статті розглянуто задачу автоматизованого виявлення та сегментації тріщин у будівельних конструкціях як важливого етапу моніторингу їх технічного стану. Об'єктом дослідження є процес аналізу цифрових зображень будівельних конструкцій, а предметом – інтелектуальні інформаційні технології сегментації тріщин на основі глибокого машинного навчання. Метою роботи є підвищення точності та ефективності виявлення тріщин шляхом розроблення інтелектуальної інформаційної технології їх автоматизованої ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання: розробка моделей сегментації без механізму уваги та з його використанням, вибір критеріїв оцінювання якості моделей і проведення чисельного експерименту. У роботі застосовано згорткові нейронні мережі (зокрема U-Net) та трансформерні архітектури (TransUNet), а також методи навчання з учителем і крос-валідації.

У результаті дослідження встановлено, що використання трансформерного механізму уваги дозволяє підвищити точність сегментації тріщин порівняно з класичними згортковими мережами. Запропонована інтелектуальна інформаційна технологія демонструє високу ефективність і може бути використана в системах автоматизованого моніторингу технічного стану будівельних конструкцій.

**Ключові слова:** виявлення тріщин, сегментація тріщин, інтелектуальні інформаційні технології, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі, U-Net; TransUNet, трансформерні моделі, моніторинг технічного стану конструкцій.

# DEEP LEARNING AND TRANSFORMER-BASED SEGMENTATION OF STRUCTURAL CRACKS IN BUILDING CONSTRUCTIONS

**Karapetyan A.[1], Fedorov E.[1], Smoliar A.[1], Miroshkina I.[1], Al-Shaikh Y. J.[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Zarqa University, Zarqa, Jordan

**Abstract.** The paper addresses the problem of automated detection and segmentation of cracks in building structures as a critical component of structural health monitoring. The object of the study is the process of digital image analysis of building structures, while the subject is intelligent information technologies for crack segmentation based on deep learning. The aim of the research is to improve the accuracy and efficiency of crack detection through the development of an intelligent information technology for their automated identification.

To achieve this goal, the following tasks are defined: development of segmentation models without and with an attention mechanism, selection of model quality evaluation criteria, and conducting numerical experiments. The study employs convolutional neural networks (in particular, U-Net) and transformer-based architectures (TransUNet), as well as supervised learning and cross-validation methods.

The results demonstrate that the use of a transformer-based attention mechanism significantly improves crack segmentation accuracy compared to conventional convolutional neural networks. The proposed intelligent information technology shows high efficiency and can be applied in automated systems for structural health monitoring of building constructions.

**Keywords:** crack detection, crack segmentation, intelligent information technologies, deep learning, convolutional neural networks, U-Net, TransUNet, transformer models, structural health monitoring.

**Вступ.** Відсутність належного та своєчасного технічного обслуговування будівель і споруд призводить до поступового погіршення їхнього технічного стану та зниження вартості активів, що зумовлює необхідність систематичного моніторингу на основі оцінювання видимих дефектів. Оскільки пошкодження конструкцій на початкових етапах часто проявляються у вигляді тріщин, їх вчасне виявлення та усунення на ранній стадії розвитку є критично важливим для запобігання поширенню серйозних руйнувань під

впливом природних або антропогенних факторів [1]. Геометричні характеристики та особливості поширення тріщин є критичними показниками технічного стану конструкцій, а їх своєчасне виявлення дозволяє суттєво зменшити витрати на обслуговування та подовжити термін експлуатації споруд [2]. Традиційний візуальний огляд фахівцями часто є трудомістким і суб'єктивним, що зумовлює активне впровадження автоматизованих методів аналізу на основі технологій комп'ютерного зору та машинного навчання в сучасні системи моніторингу будівель.

У цьому контексті аналіз тріщин на основі цифрових зображень розглядається як перспективний підхід до оцінювання пошкоджень будівельних конструкцій. Зокрема, методи сегментації зображень у поєднанні з алгоритмами глибокого машинного навчання [3, 4] дозволяють більш точно виділяти дефекти на складному фоні та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану споруд.

На сучасному етапі для забезпечення високої точності класифікації та сегментації застосовуються інтелектуальні інформаційні технології на основі глибоких нейронних мереж різних типів:

- класичні архітектури та їх гібриди (LeNet-5, зокрема з LSTM, AlexNet, VGG, DenseNet);
- високопродуктивні сімейства з розширеними можливостями екстракції ознак (ResNet, зокрема з SVM, Inception, DarkNet, Xception);
- оптимізовані моделі для мобільних платформ (MobileNet);
- спеціалізовані рішення для попіксельної сегментації (U-Net та TransUNet).

Попри високу ефективність, глибокі нейронні мережі мають низку обмежень:

- архітектурна складність (необхідність прецизійного налаштування кількості та параметрів шарів моделі);
- чутливість до умов зйомки, що може призводити до недостатньої точності виявлення тріщин на складному фоні;
- висока обчислювальна складність та значні часові витрати на навчання (параметричну оптимізацію) моделі.

Таким чином, актуальним залишається завдання створення ефективних методів виявлення та сегментації тріщин у будівельних конструкціях.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є підвищення точності локалізації та сегментації областей тріщин за допомогою нейромережевих сегментаторів.

**Постановка задачі.** Для досягнення цієї мети були визначені такі задачі:

1. Розробити модель нейромережевого сегментатора без механізму уваги.
2. Розробити модель нейромережевого сегментатора з механізмом уваги.
3. Обрати критерії якості ідентифікації параметрів нейромережевих сегментаторів.
4. Провести чисельне дослідження запропонованого методу сегментації зображень тріщин будівель.

**Вирішення проблеми.** У роботі досліджено дві моделі сегментації.

*Модель без механізму уваги (U-Net)* базується на симетричній архітектурі з енкодером та декодером. Зв'язки між рівнями реалізуються через конкатенацію карт ознак:

$$Z_i^{up} = Concat(Up(X_{i+1}^{up}), X_i^{down}),$$

де $X_i^{down}$ – карти ознак енкодера, $Up$ – операція підвищення дискретизації.

*Модель із механізмом уваги* (*TransUNet*) інтегрує блок багатоголовкової уваги (Multi-head Attention). Взаємодія між патчами зображення обчислюється як:

$$Attention(Q, K, V) = Softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V,$$

де $Q, K, V$ – вектори запитів, ключів та значень. Це дозволяє моделі фокусуватися на релевантних фрагментах тріщин, пригнічуючи фоновий шум.

Оцінювання та ідентифікація параметрів нейромережевих сегментаторів ґрунтувалися на комплексному підході, що поєднував аналіз точності класифікації, якість апроксимації та обчислювальну складність. У ролі основних критеріїв було обрано максимізацію загальної точності розпізнавання пікселів дефектів (відносно еталонних матриць) та мінімізацію

значень категоріальної крос-ентропії. Саме це дозволило найбільш ефективно оцінити розбіжність між прогнозованим та реальним розподілом класів «тріщина» та «фон» на складних текстурах будівельних конструкцій. Також враховувався часовий критерій, щоб звести до мінімуму тривалість обробки зображень. Це критично важливе для роботи системи в режимі реального часу. Оптимальний вектор ваг мережі визначався через розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, що забезпечило високу достовірність сегментації при збереженні швидкої роботи системи.

**Експерименти та результати.** Чисельне дослідження проводилося на основі набору даних Crack Segmentation Dataset [5] із використанням відповідних сегментованих масок. Навчальна вибірка склала 3717 елементів, валідаційна – 200, а тестова – 112 елементів. Сегментація виконувалася за двома класами (тріщина та фон), при цьому всі зображення були попередньо приведені до розміру 128×128 пікселів. Для підвищення узагальнювальної здатності моделі та запобігання перенавчанню застосовано метод K-fold крос-валідації ($K$=5).

Оскільки обрані нейромережеві сегментатори не містять рекурентних зв'язків, навчання здійснювалося за допомогою GPU. Для реалізації запропонованих нейромережевих сегментаторів використовувався пакет tensorflow, як програмне середовище було обрано Google Colab.

Отримані значення ймовірності сегментації для моделей U-Net та TransUNet склали 0,90 та 0,95 відповідно. За результатами чисельних експериментів встановлено наступне:

– оптимальною з точки зору мінімізації функції втрат є архітектура, що містить чотири послідовні блоки «згортка – зміна дискретизації»;

– найкращу точність сегментації демонструє модель TransUNet, що зумовлено інтеграцією трансформерного механізму уваги, який дозволяє враховувати глобальні залежності між віддаленими областями зображення.

**Висновок.** Проведено порівняльний аналіз методів машинного та статистичного навчання для діагностики стану будівельних конструкцій. Встановлено, що нейромережеві моделі сегментації демонструють найвищу ефективність у виявленні дефектів складної геометрії порівняно з класичними алгоритмами обробки зображень.

Реалізовано підхід до навчання сегментаторів за принципом «навчання з учителем» на основі попередньо розмічених наборів даних. Емпіричне обґрунтування глибини мережі та конфігурації її шарів дозволило оптимізувати архітектуру моделі, що забезпечує високу точність локалізації та сегментації областей тріщин і, відповідно, дає змогу автоматизувати процес дефектоскопії будівельних об'єктів.

Перспективи подальших досліджень полягають в інтеграції розробленого методу в інтелектуальні системи автоматизованого моніторингу. Це дозволить масштабувати рішення для оцінки стану різнорідних конструкційних матеріалів, таких як бетон, метал та композити.

## Список використаних джерел


1. Smoliar, A., Miroshkina, I. (2024). Computer Modeling of Strengthening Mechanics of Glass Structural Elements by Compressive Stresses. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_33
2. Hurtik, P., Molek, V., Hula, J., Vajgl, M., Vlasanek, P., & Nejezchleba, T. (2022). Poly-YOLO: higher speed, more precise detection and instance segmentation for YOLOv3. Neural Computing and Applications, 34(10), 8275-8290. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.13243
3. Huang, H., Wu, Z., Shen, H. (2024). A three-stage detection algorithm for automatic crack-width identification of fine concrete cracks. Journal of Civil Structural Health Monitoring 14, 1373–1382. https://doi.org/10.1007/s13349-024-00797-7
4. Kheradmandi, N., Mehranfar, V. (2022). A critical review and comparative study on image segmentation-based techniques for pavement crack detection. Construction and Building Materials 321, 126162. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126162
5. Crack Segmentation Dataset. https://docs.ultralytics.com/datasets/segment/crack-seg/

# ГІБРИДИЗАЦІЯ МЕТРИЧНОГО ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**Клоков А.Р., Дяченко П.В.**
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація**. У роботі проведено дослідження ефективності прогнозування дефектів модулів програмного забезпечення детермінованими, інтелектуальними та ансамблевими методами. Метою роботи є порівняння точності та повноти передбачень з використанням порогу цикломатичної складності, логістичної регресії, наївного Байєса, м'якого голосування, стекінгу та каскадної фільтрації. Об'єктом дослідження є забезпечення якості та надійності вихідного коду програмних систем. Предметом дослідження є детерміновані, інтелектуальні та ансамблеві методи автоматизованого прогнозування ризиків програмних модулів. Завдання роботи включають підбір, аналіз та попередню обробку вхідного датасету, реалізацію методу Маккейба, логістичної регресії, наївного Байєса та їх комбінацій у формі м'якого голосування, стекінгу й каскадної фільтрації, а також порівняння результатів роботи цих підходів за величинами повноти та точності.

**Ключові слова**: цикломатична складність, логістична регресія, наївний Байєс, м'яке голосування, стекінг, каскадна фільтрація.

# HYBRIDIZATION OF METRIC AND INTELLECTUAL DATA ANALYSIS FOR SOFTWARE DEFECT DETECTION

**Klokov A., Dyachenko P.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper studies the effectiveness of software module defect prediction using deterministic, intelligent, and ensemble methods. The aim of the paper is to compare the accuracy and completeness of predictions using the cyclomatic complexity threshold, logistic regression, naive Bayes, soft voting, stacking, and cascade filtering. The object of the research is to ensure the quality and reliability of the source code of software systems. The subject of the research is deterministic, intelligent, and ensemble methods for automated software module risk prediction. The tasks of the paper include selection, analysis, and preprocessing of the input dataset, implementation of the McCabe method, logistic regression, naive Bayes, and their combinations in the form of soft voting, stacking, and cascade filtering, as well as comparison of the results of these approaches in terms of completeness and accuracy.

**Keywords**: cyclomatic complexity, logistic regression, naive Bayes, soft voting, stacking, cascade filtering.

**Вступ.** За останні десятиліття спостерігається стрімке зростання об'єму та складності вихідного коду програмних систем, що створює умови для зростання у ньому кількості помилок. Для їх передбачування станом на зараз часто використовують підходи, які базуються на жорстких математичних формулах та порогах, незважаючи на їх явну застарілість, що проявляється головним чином у низькій гнучкості та нездатності виявляти приховані закономірності. Подолати недоліки жорстких методів можна за допомогою методів інтелектуальних, які однак теж стикаються із певними проблемами: низькою інтерпретованістю, високою чутливості до викидів та нестабільністю при роботі з малими вибірками. Одним із перспективних напрямів для подолання недоліків обох підходів є гібридизація.

**Постановка задачі.** Серед підходів до дослідження програмних модулів на наявність дефектів зазвичай використовуються метричні методи аналізу коду, які забезпечують чіткість та стійкість результатів, жертвуючи зоною охоплення та гнучкістю. Сучасні ж методи машинного навчання здатні спрогнозувати баг за непрямими ознаками, будучи при цьому чутливими до аномалій. Це дозволяє сформулювати гіпотезу, що використання детермінованих та інтелектуальних підходів у синергії дозволить їм збалансувати одне одного та підвищити якість виявлень помилок у програмних системах.

**Мета роботи:** Дослідження різнорідних поєднань класичних й інтелектуальних методів для прогнозування появи дефектів модулів ПЗ та порівняння їх ефективності із застосуванням поодиноких моделей.

**Основна частина.** У якості методів для прогнозування дефектів програмних модулів було використано цикломатичну складність, також відому як метрика Маккейба, логістичну регресію на наївного Байєса [1]. Такий вибір обумовлено його охопленням всього спектру аналітичних підходів: від встановлення простого порогу до імовірнісних та статистичних моделей машинного навчання. Для комбінування моделей залучено три методи, що дозволяють стабілізувати прогноз та розставити пріоритети між моделями: м'яке голосування, стекінг та каскадну фільтрацію [2].

Метод Томаса Маккейба – це міра складності логічної структури програми, що рахує кількість лінійно незалежних шляхів. Для поточної задачі його реалізовано як експертне порогове правило, що виглядає наступним чином: $v(g) > 10$ [1].

Логістична регресія – це статистична модель, яка розраховує імовірність належності об'єкта до певного класу. Вона особливо добре демонструє себе в задачах бінарної класифікації, таких як у цій роботі. Регресія надає високу точність при невибагливості до об'ємів вхідних даних, інтерпретованості та стійкості до викидів.

Наївний Байєс – це імовірнісний класифікатор, що базується на теоремі Байєса. На відміну від класичного алгоритму Байєса, він робить припущення про повну незалежність ознак одна від одної. Це робить його переваги аналогічними до логістичної регресії та важливими для надалі використовуваного датасету, при цьому базуючись на імовірнісній, а не статистичній логіці [1].

М'яке голосування – це метод об'єднання прогнозів моделей шляхом усереднення імовірностей кожної із них. Таким чином він враховує впевненість кожної моделі і приймає за істину рішення із найвищим балом [2].

Стекінг – ще одна техніка ансамблювання, мета якої – навчити окрему мета-модель грамотно поєднувати прогнози інших. Він є гарним рішенням для випадків, коли методи мають різні сильні та слабкі сторони, яким і є наш випадок – комбінування логістичної регресії з наївним Байєсом [2].

Каскадна фільтрація – це стратегія, за якої дані проходять через серію рівнів, де на кожному наступному етапі робота ведеться виключно з результатами попереднього. Цей метод, на відміну від голосування, послідовно об'єднує незалежні аналітичні систем для максимально повного охоплення та підстраховки один одного [2].

У якості вхідних даних для цієї роботи було використано відкритий датасет NASA Metrics Data Program, що містить реальні дані про одну із програмних систем управління [3]. Поля цього файлу являють собою кількісні характеристики коду, які можна розділити на три категорії: метрики Маккейба, метрики Холстеда та метрики об'єму. Останнім полем є бінарна величина defects, яка приймає значення TRUE при наявності дефекту та FALSE при його відсутності. Кожен запис являє собою окремий програмний модуль, функцію або процедуру.

Для проведення дослідження було використано мову програмування Python, середовище Visual Studio Code та бібліотеку для роботи зі штучним інтелектом sklearn. Варто зазначити, що перед безпосереднім застосуванням методів та їх комбінацій було проведено балансування вхідних даних, оскільки даний датасет містить набагато більше справних модулів, ніж дефектних.

Для порівняння ефективності кожного підходу було виміряно два показники: повноту та точність прогнозів. Повнота являє собою частку реальних знайдених багів, в той час як точність – частоту вірних спрацьовувань. Результат роботи алгоритму, візуалізований у вигляді діаграми, представлено на рисунку 1.

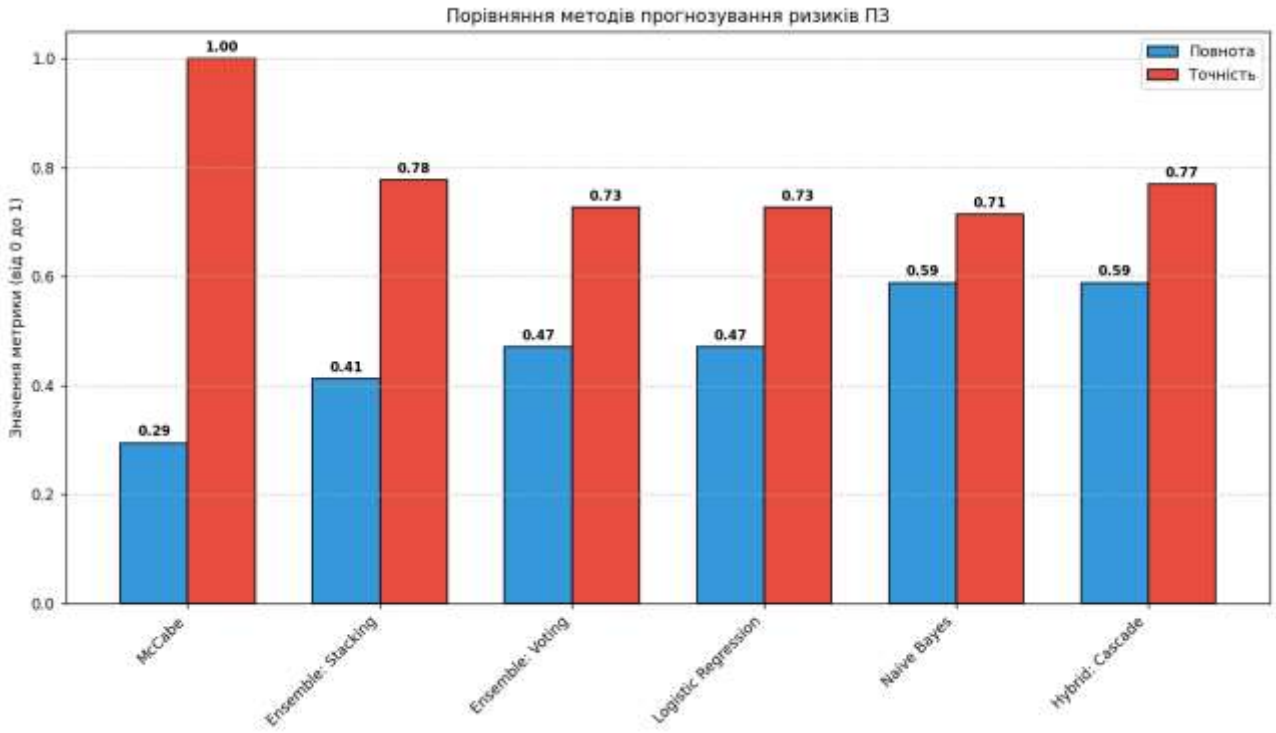



Рис. 1. Порівняння індивідуальних та ансамблевих методів прогнозування ризиків ПЗ

З отриманих результатів видно, що інтелектуальні методи мають перевагу у повноті, однак відстають у точності від простого аналізу цикломатичної складності. Комбінація методів у вигляді м'якого голосування виявилась аналогічною самостійному використанню логістичної регресії, а метод стекінгу показав пропорційний ріст точності на 0.05 одиниць та падіння повноти на 0.06. Найбільш збалансованим виявилось застосування одиночного наївного Байєса й каскадної фільтрації із ідентичними показниками повноти у 0.59, однак із явною перевагою комбінованого підходу у точності на 0.06 одиниць.

**Висновки.** У ході проведення дослідження було виявлено, що при спробі передбачити наявність дефектів у модулях програмного забезпечення на основі метрик коду інтелектуальні методи демонструють набагато кращу збалансованість повноти й точності у своїх передбаченнях, ніж традиційні. Однак це не означає, що жорсткі методи остаточно відійшли у минуле. Їх варто використовувати при дефіциті ресурсів на тестування коду та у взаємодії з методами ШІ у вигляді ансамблів. Інтелектуальні ж та гібридні методи варто застосовувати у ІТ-проєктах середньої та високої складності, де вартість помилки на етапі розробки буде набагато меншою, ніж на релізі.

## Список використаних джерел


1. G.Vamsi Krishna, M.Chaitanya Meher, Khushboo Jain, D.Nagamallesawari. Prediction of Source Code Quality Using Cyclomatic Complexity and Machine Learning. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2020. Vol. 9, No. 4. P. 4409–4413. DOI: 10.30534/ijatcse/2020/34942020.
2. Matloob F., Ghazal T.M., Taleb N., Aftab S., Ahmad M., Khan M.A., Abbas S., Soomro T.R. Software Defect Prediction Using Ensemble Learning: A Systematic Literature Review. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 98754–98771. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3095559.
3. Mcmurray S., Sodhro A.H. A Study on ML-Based Software Defect Detection for Security Traceability in Smart Healthcare Applications. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 7. P. 3470. DOI: 10.3390/s23073470.

# МУЛЬТИМОДАЛЬНА CPU-ЕФЕКТИВНА АРХІТЕКТУРА ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ЖУРНАЛАХ ПОДІЙ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ

**Kolisnichenko P.[1], Гнатюк Д.[2], Цікановський В.[3]**
[1]International Cooperation WSHIU Academy of Applied Sciences, Poznan, Poland,
[2]Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького,
[3]Черкаський державний технологічний університет

**Анотація**. Мета роботи полягає у розробці та експериментальній перевірці мультимодальної CPU-ефективної гібридної архітектури виявлення аномалій у журналах подій розподілених систем, що передбачає опціональне поєднання потоків журналів та числових метрик у єдиному класифікаторі. Завдання роботи – побудова раннього злиття модальностей на рівні гібридного вектора ознак для кожного часового вікна, реалізація формального runtime-контракту сумісності модальностей задля унеможливлення silent wrong-answer багів, забезпечення ефективної агрегації метричного потоку через індексований пошук на відсортованих часових мітках, а також формулювання практичної стратегії отримання тренувальних міток у корпоративних середовищах. Об'єктом дослідження є системи виявлення аномалій у журналах подій розподілених систем; предметом дослідження є мультимодальні архітектури поєднання журналів та метрик для CPU-ефективної класифікації. Методи досліджень: двошарова двоспрямована LSTM-мережа з подвійною задачею навчання, ансамбль XGBoost з нативною обробкою пропущених значень, early fusion модальностей, векторизована агрегація NumPy, формальна runtime-валідація схеми ознак. Результати досліджень полягають у досягненні F1 = 0.9826 на повному наборі Apache Hadoop HDFS v1 у CPU-only режимі та емпіричному підтвердженні архітектурного інваріанту graceful degradation, за якого fusion-модель за повної відсутності метричного сигналу зберігає якість не нижчу за log-only baseline.

**Ключові слова:** виявлення аномалій, журнали подій, мультимодальне навчання, early fusion, XGBoost, CPU-only inference, graceful degradation.

# A MULTIMODAL CPU-EFFICIENT ARCHITECTURE FOR ANOMALY DETECTION IN LOGS OF DISTRIBUTED SYSTEMS

**Kolisnichenko P.[1], Hnatiuk D.[2], Tsikanovskyi V.[3]**
[1]International Cooperation WSHIU Academy of Applied Sciences, Poznan, Poland,
[2]The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
[3]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The purpose of the work is to develop and experimentally verify a multimodal CPU-efficient hybrid architecture for anomaly detection in logs of distributed systems, providing optional fusion of log streams and numerical metrics within a single classifier. The focus of the paper is to design early fusion of modalities at the level of a per-window hybrid feature vector, to implement a formal runtime contract of modality compatibility that eliminates silent wrong-answer bugs, to provide efficient metric stream aggregation through indexed lookup on sorted timestamps, and to formulate a practical strategy for obtaining training labels in enterprise environments. The object of research is anomaly detection systems for logs of distributed systems; the subject of research is multimodal architectures combining logs and metrics for CPU-efficient classification. Research methods: a two-layer bidirectional LSTM network with a dual learning task, an XGBoost ensemble with native handling of missing values, early fusion of modalities, vectorized NumPy aggregation, and formal runtime validation of the feature schema. The results of the research consist in achieving F1 = 0.9826 on the full Apache Hadoop HDFS v1 dataset in CPU-only mode and in empirical confirmation of the graceful degradation architectural invariant, under which the fusion model preserves a quality no worse than the log-only baseline even with the metric signal completely absent.

**Keywords:** anomaly detection, event logs, multimodal learning, early fusion, XGBoost, CPU-only inference, graceful degradation.

**Вступ.** Сучасні production-системи генерують два принципово різні потоки операційних даних: структуровані журнали подій та числові метричні ряди. Кожен з них містить унікальний набір ознак інцидентів, тому будь-який класифікатор, що спирається

лише на одну з цих модальностей, неминуче має сліпі зони. Поєднання обох типів даних в одному класифікаторі є необхідною умовою для повного виявлення інцидентів, проте більшість існуючих рішень або працюють лише з одним типом даних, або потребують GPU-інфраструктури, що ускладнює їх практичне впровадження у корпоративних середовищах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

**Мета роботи полягає** у розробці мультимодальної CPU-ефективної гібридної архітектури виявлення аномалій у журналах подій розподілених систем, яка дозволяє поєднувати журнали подій та потік метрик у єдиному класифікаторі через раннє злиття ознак, зберігає формальну сумісність з уже наявними log-only моделями та передбачає практично відтворювану стратегію отримання тренувальних даних.

**Постановка проблеми.** Систематичний аналіз існуючих підходів до виявлення аномалій у журналах подій [1-3, 7] виявляє чотири методологічні прогалини, які формують простір наукової новизни цієї роботи.

По-перше, у літературі немає рішень, які одночасно працюють лише на центральному процесорі та поєднують журнали з метриками: ефективні CPU-методи аналізують лише журнали, а методи поєднання двох типів даних здебільшого потребують графічних прискорювачів (GPU) [6]. Водночас обидва типи даних доповнюють один одного: фоновий процес-майнер із низьким пріоритетом не помітний у журналах (звичайний INFO-трафік), але виявляється через завантаження процесора 85–95% замість історичних 12%; помилковий запит до бази з порожнім результатом не змінює метрик, але залишає WARN- та ERROR-сліди у журналі. Тому архітектура має виконуватись лише на процесорі, підтримувати обидва типи даних, плавно переходити до режиму лише журналів за відсутності метрик і зберігати сумісність із уже розгорнутими моделями.

По-друге, проблема прихованих помилок (коли модель отримує дані не того типу й повертає формально правильну, але змістовно хибну відповідь) описана у [4] як відкрите питання промислових ML-систем, однак жодне з опублікованих рішень для виявлення аномалій у журналах не вбудовує перевірку типу даних у класифікатор. Через це модель, розгорнута у середовищі без потрібного типу даних, не падає з помилкою, а просто непомітно погіршує якість роботи, що практично неможливо діагностувати.

По-третє, швидкий пошук діапазону на відсортованих часових мітках відомий з базової літератури з алгоритмів, але у роботах із виявлення аномалій у журналах його не описують як окремий компонент із гарантіями продуктивності. Більшість підходів використовує просте лінійне перебирання масиву, що не масштабується на реальні потоки з мільйонами вимірювань на добу.

По-четверте, твердження про відсутність розмічених даних у компаніях не відповідає дійсності - системи реєстрації інцидентів (Jira, ServiceNow, PagerDuty), історія спрацювань SIEM, post-mortem звіти й публічні набори даних (HDFS v1, BGL, Thunderbird, OpenStack) містять багаторічну історію інцидентів. Однак систематизована методологія їх перетворення на тренувальні мітки для мультимодальних моделей - із залученням сучасних AI-підходів (програмна розмітка на основі правил, використання великих мовних моделей як автоматична система виявлення міток, активне навчання, генеративна симуляція рідкісних інцидентів) - у літературі не представлена.

Опираючись на ці прогалини, у роботі необхідно побудувати архітектуру, яка одночасно забезпечує CPU-only виконання, підтримку обох модальностей із механізмом graceful degradation, формальну runtime-перевірку сумісності типів вхідних даних та практичну стратегію формування тренувальної вибірки.

**Розв'язання проблеми.** Запропоновано мультимодальну гібридну архітектуру (рис. 1) з двома паралельними каналами вхідних даних та раннім злиттям модальностей на рівні per-window гібридного вектора ознак, що подається на єдиний класифікатор.

Канал журналів приймає структуровані JSON-записи, типові для log aggregation systems Elasticsearch, Splunk, Loki; канал метрик приймає JSONL-потоки machine-scope та process-scope з фіксованим 5–10-секундним кадансом.

Вибір early fusion замість late fusion обґрунтовано здатністю класифікатора виявляти joint cross-modal patterns у спільному feature space (наприклад, поєднання повільного SQL-запиту в логах з підвищеним CPU у метриках значно краще вказує на аномалію бази даних, ніж кожен сигнал окремо), нативною підтримкою відсутніх значень XGBoost [5] та збереженням єдиної моделі для inference.

Архітектура містить десять послідовних функціональних блоків: доменно-орієнтований нормалізатор LogNormalizer що забезпечує повне покриття; токенізатор VocabularyBuilder із багаторівневим кешем результатів; контекстно-орієнтований ContextAwareWindowBuilder з ізольованими circular-буферами для кожної пари (host, service), що гарантує швидкість для операції додавання, безпечну паралельність на рівні буфера та сумарне споживання пам'яті <150 КБ при 20 активних контекстах; двошарову bidirectional LSTM-мережу з подвійною задачею навчання, що одночасно формує векторні представлення для XGBoost через проєкційний шар та виконує внутрішню бінарну класифікацію як тренувальний сигнал; два варіанти екстрактора статистичних ознак – FeatureExtractor та SessionFeatureExtractor; метричний шлях MetricAggregator з двохрівневими індексами, реалізованими як dict of numpy arrays із паралельними масивами та відсортованою колонкою ts, що забезпечує range lookup через np.searchsorted без копіювання даних та векторизовану агрегацію NumPy; шар раннього злиття трьох джерел ознак, що формує гібридні вектори розмірністю 84, 96 (logs_and_metrics) - причому метричні ознаки додаються у кінець вектора, що забезпечує позиційну зворотну сумісність з log-only моделями на архітектурному рівні; per-context XGBoost-класифікатор з sparsity-aware split finding [5] та правилом dimensionality tripwire (перехід до глобального резервного класифікатора у тих контекстах, де відношення кількості тренувальних прикладів до кількості ознак недостатнє для надійного навчання); шар адаптивної порогової класифікації з індивідуальними порогами для кожного контексту з метою мінімізації хибнопозитивних спрацьовувань у production; runtime gate формального контракту сумісності модальностей.

SHA-256 хеша впорядкованого списку назв ознак, серіалізації цих метаданих разом із моделлю та валідації перед predict() з можливістю override через змінну середовища. Для компенсації різних розмірів популяцій вікон з повним та частковим метричним покриттям під час тренування застосовано sample weighting, що гарантує однаковий внесок обох популяцій у gradient computation.

Загальна кількість параметрів моделі – 206 337. Експериментальна перевірка проведена на трьох наборах даних: повному Apache Hadoop HDFS v1 (575 061 сесія, 16 838 аномальних, рівень аномалій 2.93%) як галузевому реальному еталоні; синтетичному 20K e-commerce (5 хостів, 4 типи сервісів, ~21% аномалій) як стабільному log-only baseline; синтетичному 60K для повної ablation matrix із семи конфігурацій. На HDFS v1 досягнуто F1 = 0.9826, Precision = 0.9895, Recall = 0.9757, з 174 хибнопозитивними спрацьовуваннями на 558 223 нормальних сесії (0.031% FPR), що перевищує DeepLog [1] та LogAnomaly [2] й наближається до GPU-залежного LogRobust [3]. Ablation на 60K показав монотонне зростання F1 зі збільшенням покриття метриками (0.9511 > 0.9517 > 0.9523 > 0.9541) та успішне проходження hard gate graceful degradation: fusion-модель, натренована з 50% метричним покриттям і виконуючи inference у середовищі з повною відсутністю метрик досягає F1 = 0.9517 проти 0.9511 у log-only baseline, тобто перевиконує формальний інваріант. End-to-end латентність класифікації одного повідомлення становить 25.11 мс на AMD Ryzen 5 5600X при сумарному споживанні пам'яті ~186 МБ та пропускній здатності ~40 повідомлень/с в однопотоковому режимі.

**Висновки.** Запропонована архітектура демонструє, що мультимодальне розширення CPU-ефективних систем виявлення аномалій можливе без GPU-інфраструктури за збереження формальних гарантій сумісності типів вхідних даних, зворотної сумісності з log-only моделями та практично відтворюваної стратегії отримання тренувальних даних. Це робить підхід придатним для впровадження у промислових IoT-системах, корпоративних дата-центрах без GPU, регульованих галузях та критично важливих SOC-системах, де висока точність є необхідною для уникнення втоми операторів від хибних сповіщень.

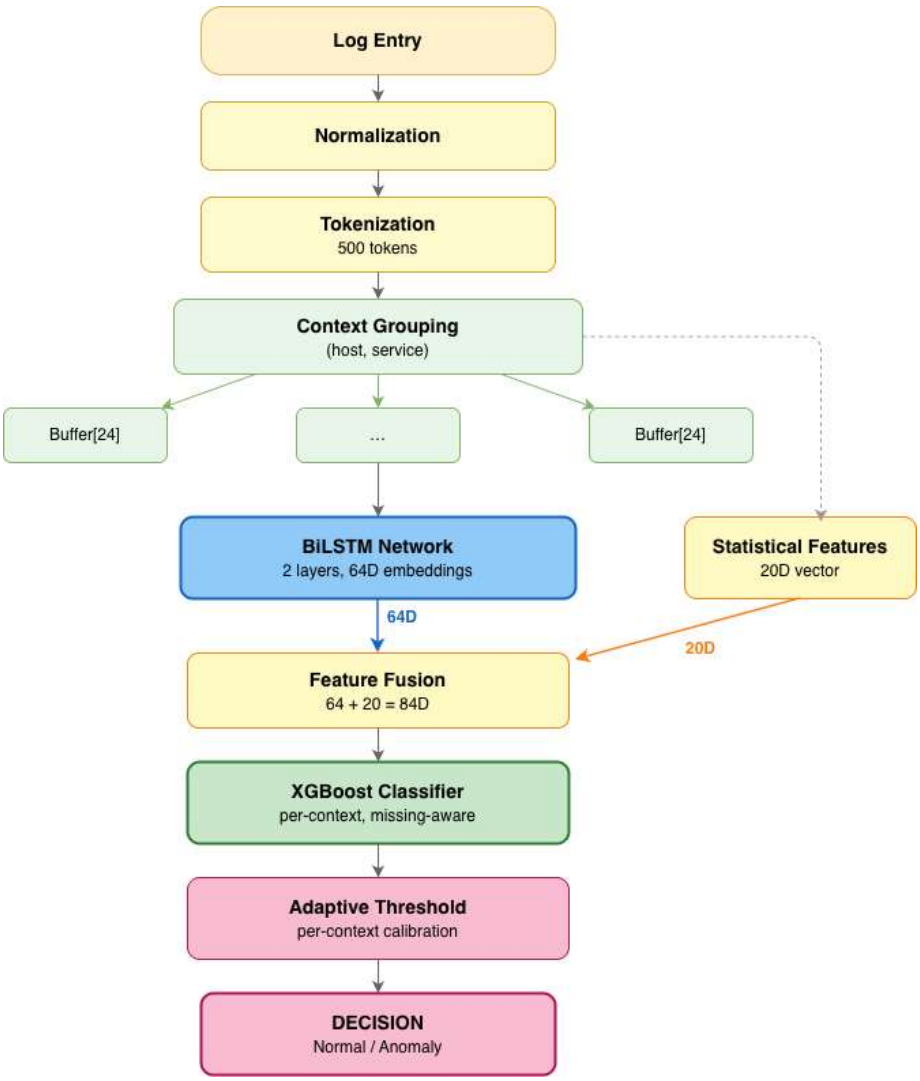



Рис. 1. Мультимодальна CPU-ефективна архітектура виявлення аномалій у журналах подій

## Список використаних джерел


1. Du, M., Li, F., Zheng, G., Srikumar, V. (2017). DeepLog: Anomaly Detection and Diagnosis from System Logs through Deep Learning. Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, 1285–1298. URL: https://www2.cs.utah.edu/~lifeifei/papers/deeplog.pdf.
2. Meng, W., Liu, Y., Zhu, Y. et al. (2019). LogAnomaly: Unsupervised Detection of Sequential and Quantitative Anomalies in Unstructured Logs. Proceedings of the IJCAI 2019, 4739–4745. URL: https://www.ijcai.org/Proceedings/2019/658.
3. Zhang, X., Xu, Y., Lin, Q. et al. (2019). Robust Log-Based Anomaly Detection on Unstable Log Data. Proceedings of the 2019 27th ACM Joint Meeting ESEC/FSE, 807–817. URL: https://hongyujohn.github.io/FSE19b.pdf.
4. Sculley, D., Holt, G., Golovin, D. et al. (2015). Hidden Technical Debt in Machine Learning Systems. Advances in Neural Information Processing Systems 28. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/86df7dcfd896fcaf2674f757a2463eba-Paper.pdf.
5. Chen, T., Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD, 785–794. URL: https://arxiv.org/pdf/1603.02754.
6. Baltrušaitis, T., Ahuja, C., Morency, L.-P. (2019). Multimodal Machine Learning: A Survey and Taxonomy. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 41(2), 423–443. URL: https://arxiv.org/pdf/1705.09406.
7. Gupta, R. et al. (2023). A systematic survey of log anomaly detection methods. Machine Learning with Applications. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666827023000233.

# ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИКЛУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ LLM-АГЕНТІВ У СЕРЕДОВИЩА РОЗРОБКИ ТА CI/CD ПРОЦЕСИ

**Кравчук Р.Ю., Ніколюк П.К.**
Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця, Україна

**Анотація.** У роботі досліджується трансформація сучасної парадигми життєвого циклу розробки програмного забезпечення (SDLC) під впливом інтелектуальних архітектур на базі моделей Transformer. Метою роботи є аналіз ефективності впровадження ШІ-агентів як активних учасників процесу розробки, що здатні взаємодіяти з контекстом проєкту та інфраструктурою CI/CD. Об'єктом дослідження виступає процес розробки та супроводження програмних продуктів в умовах інтеграції великих мовних моделей (LLM). Предметом дослідження є інструментальні можливості та архітектурна специфіка сучасних ШІ-агентів, зокрема таких рішень, як Claude Code та спеціалізованих CLI-інтерфейсів. У ході роботи використано методи системного аналізу, порівняльного огляду архітектурних рішень та метод практичних досліджень. Результати дослідження демонструють, що використання технологій RAG та розширеного контекстного вікна дозволяє ШІ-агентам вибудовувати ментальні карти проєктів, автоматизувати глибокий рефакторинг та Code Review. Встановлено, що впровадження таких інструментів скорочує час виконання рутинних задач. Проте виявлено ключові ризики, пов'язані з галюцинаціями моделей та проблемою детермінізму, що зумовлює необхідність формування у розробників навичок критичної валідації (AI Literacy). Зроблено висновок, що майбутнє розробки полягає у переході до інтелектуальних екосистем, де ШІ-агенти стають невід'ємною частиною CI/CD процесів.

**Ключові слова:** ші-агенти, великі мовні моделі, автоматизація розробки, інтеграція.

# OPTIMIZING THE SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE BY INTEGRATING LLM AGENTS INTO DEVELOPMENT ENVIRONMENTS AND CI/CD PROCESSES

**Kravchuk R.Y., Nikolyuk P.K.**
Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine

**Abstract.** The paper explores the transformation of the modern software development life cycle (SDLC) paradigm under the influence of intelligent architectures based on Transformer models. The aim of the work is to analyze the effectiveness of implementing AI agents as active participants in the development process, capable of interacting with the project context and CI/CD infrastructure. The object of the study is the process of software development and maintenance under conditions of large language model (LLM) integration. The subject of the study is the instrumental capabilities and architectural specifics of modern AI agents, specifically solutions such as Claude Code and specialized CLI interfaces. In the course of the work, methods of systems analysis, a comparative review of architectural solutions, and the method of practical research were used. The results of the study demonstrate that the use of RAG technologies and extended context windows allows AI agents to build mental maps of projects and automate deep refactoring and Code Review. It has been established that the implementation of such tools reduces the time required to perform routine tasks. However, key risks related to model hallucinations and the problem of determinism have been identified, which necessitates the development of critical validation skills (AI Literacy) in developers. It is concluded that the future of development lies in the transition to intelligent ecosystems, where AI agents become an integral part of CI/CD processes.

**Keywords:** AI agents, large language models, development automation, integration.

**Вступ.** Сучасна парадигма розробки програмного забезпечення (SDLC) зазнає фундаментальних змін у зв'язку з переходом від систем статичного аналізу коду до інтелектуальних архітектур на базі Transformer. Використання великих мовних моделей (LLM) дозволяє автоматизувати не лише написання окремих фрагментів коду, а й складні логічні ланцюжки на всіх етапах життєвого циклу продукту [1].

**Мета роботи.** Метою цієї роботи є дослідження ефективності впровадження ШІ-агентів як активних учасників розробки, що здатні взаємодіяти з контекстом проєкту та інфраструктурою CI/CD.

**Постановка задачі.** Традиційні підходи до автоматизації розробки (SDLC) наразі досягли свого ліміту, оскільки базуються на статичному аналізі, що не враховує динамічний семантичний контекст великих проєктів. Основна проблема полягає у критичному когнітивному навантаженні на розробника при виконанні крос-файлових операцій та підтримці складної інфраструктури CI/CD. Попри значний потенціал великих мовних моделей, існують фундаментальні виклики: ризики витоку даних при виборі між хмарними та локальними рішеннями, а також технічні обмеження, такі як «галюцинації» API та низький рівень детермінізму при генерації складних логічних ланцюжків. Основним завданням дослідження є аналіз того, чи можуть ШІ-агенти мінімізувати ці ризики та стати повноцінними учасниками розробки, здатними до самостійного контекстного аналізу без погіршення безпеки продукту [2].

**Вирішення проблеми.** Для розв'язання окреслених проблем пропонується впровадження спеціалізованих код-орієнтованих моделей (наприклад, серії Claude), які використовують технологію Retrieval-Augmented Generation (RAG) та вдосконалені механізми контекстного вікна. На відміну від загальних чат-ботів, такі агенти індексують усю структуру репозиторію, що дозволяє їм враховувати взаємозв'язки між компонентами, типами даних та архітектурними патернами в реальному часі [3].

Емпіричний аналіз підтверджує, що архітектурна ефективність таких інструментів дозволяє значно покращити структурну якість коду: індекс підтримуваності (Maintainability Index) зростає в середньому на 18,2%, а цикломатична складність функцій зменшується на 14,6%. Це безпосередньо вирішує проблему когнітивного навантаження, перекладаючи рутинний аналіз взаємозв'язків на інтелектуальну систему [2].

Проте впровадження ШІ-агентів не є панацеєю і створює нову площину ризиків, описаних у постановці задачі. Зокрема, прагнення до швидкості часто вступає в конфлікт із безпекою. Експериментальні дані показують, що хоча продуктивність зростає, кількість вразливостей у згенерованому коді може збільшуватися на 23,7%. Це зумовлено тим, що моделі часто пропонують застарілі методи бібліотек або не враховують специфічні для мови проблеми безпеки пам'яті. Таким чином, вирішення проблеми детермінізму полягає не у повній автоматизації, а у зміні стратегії взаємодії. Було виділено три основні підходи: «prompt-and-accept» (38% учасників), що є найбільш ризикованим через низьку валідацію, «iterative refinement» (47% учасників), та «validation-oriented» (15% учасників), де ШІ використовується як агент-консультант із обов'язковою перевіркою кожного кроку [2].

Важливим інструментальним рішенням у подоланні «галюцинацій» та помилок API стала поява автономних ШІ-агентів з інтерфейсом командного рядка (CLI), що мають розширені права доступу до середовища розробки. Такі агенти володіють прямим доступом до файлової системи, терміналу та інструментів тестування, що дозволяє їм миттєво верифікувати власні припущення в автономному режимі. Якщо модель «вигадує» параметр функції, вона отримує зворотний зв'язок у вигляді помилки від компілятора безпосередньо в терміналі та самостійно виправляє її ще до етапу перевірки коду людиною. Це значно знижує накопичення технічного боргу на ранніх етапах. Водночас інтеграція таких систем у CI/CD процеси дозволяє автоматизувати Automated Code Review. Агенти аналізують Pull Requests на предмет складних логічних конфліктів, що дозволяє виявити до 76% вразливостей, які могли б бути пропущені розробником через втому чи обмежений контекст проєкту [2].

Ще одним аспектом вирішення проблеми є автоматизація документації та тестування. ШІ-агенти збільшують покриття документацією до 68,3%, що полегшує подальшу підтримку проєкту іншими розробниками. Однак тут криється ризик збільшення дублювання коду (до 8,7%), оскільки ШІ схильний копіювати успішні патерни замість створення гнучких абстракцій. Практичні дослідження показують, що при правильному налаштуванні інструментів на кшталт Cursor або Claude Code час виконання типових інженерних завдань скорочується на 60–70%, але лише за умови, що розробник володіє навичками критичної валідації, а не просто довіряє системі [2].

**Висновок.** Дослідження підтверджує, що впровадження ШІ-агентів як активних учасників розробки фундаментально змінює структуру SDLC, забезпечуючи приріст продуктивності в середньому на 31,4%. Найбільша ефективність спостерігається у мові Python (+36,7%), тоді як у C++ приріст дещо нижчий через складність управління пам'яттю та вищий ризик помилок. Проте виявлені в постановці задачі ризики залишаються актуальними: кількість критичних помилок при бездумному використанні ШІ зростає на 89%, а junior-розробники, які схильні приймати до 89% пропозицій без перевірки, стають найбільш вразливою ланкою в команді [2].

Концептуальна трансформація середовищ розробки в інтелектуальні екосистеми доводить, що максимальний синергетичний ефект досягається не шляхом автономного витіснення людського капіталу, а через інтенсифікацію парадигми AI Literacy. Системний розподіл функцій у межах оновленого життєвого циклу передбачає делегування ШІ-агентам з інтерфейсом командного рядка та інтегрованим RAG-аналізом рутинних процесів: від генерації шаблонного коду до автоматизації експертного оцінювання. Таке інструментальне рішення забезпечує еволюцію метрик програмного забезпечення, проте вимагає відмови від ризикованої стратегії «prompt-and-accept» на користь контрольно-валідаційних підходів. З огляду на зафіксоване в роботі зростання кількості потенційних вразливостей та критичних дефектів при невалідованому масштабуванні коду, саме переорієнтація інженера на високорівневе проєктування, архітектурний контроль та верифікацію безпеки є базовою умовою подолання проблеми детермінізму.

**Список використаних джерел**


1. LLMs: What's a large language model (2026). URL: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/llm/transformers?hl=uk
2. Sankhe P., Patil N., Ghorpade M. (2025). Empirical analysis of AI-assisted code generation tools: impact on code quality, security and developer productivity. IJFMR Res. 6, 1548.
3. Retrieval augmented generation (RAG) for projects (2026). URL: https://surl.li/cskoej

# ГІБРИДНИЙ АЛГОРИТМ НЕІНТРУЗИВНОГО МОНІТОРИНГУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ТА ЖАДІБНОГО ЗАПОВНЕННЯ

**Лось В.Ю.[1], Розломій І.О.[2]**
[1]Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. Метою роботи є розробка та валідація гібридного алгоритму неінтрузивного моніторингу навантаження (NILM), здатного ефективно виконувати дезагрегацію енергоспоживання в умовах даних низького розрізнення та неточних апріорних знань. Об'єктом дослідження є процес дезагрегації електроспоживання будівлі за агрегованим сигналом лічильника. Предметом дослідження є методи оптимізації розкладів роботи приладів на основі еволюційних алгоритмів. Для вирішення задачі використовується гібридний підхід, що поєднує генетичний алгоритм із евристичним жадібним заповненням залишкового сигналу. Апріорні патерни споживання приладів – надані користувачем або автоматично вилучені з архівних даних – слугують напрямними зміщеннями в цільовій функції. Алгоритм виконується у два послідовних етапи: спочатку оптимізуються великі споживачі, потім решта гнучких приладів. Запропонований метод досягає точності енергетичного балансу 94,6% на публічному наборі даних ECO та 85,7% на реальних даних домогосподарства з апроксимованими патернами, що підтверджує його практичну придатність за умов інформаційної невизначеності.

**Ключові слова**: неінтрузивний моніторинг навантаження, дезагрегація енергії, генетичний алгоритм, енергоефективність.

# HYBRID NON-INTRUSIVE LOAD MONITORING ALGORITHM BASED ON GENETIC ALGORITHM AND GREEDY FILLING

**Los V.Y.[1], Rozlomii I.O.[2]**
[1]Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The aim of this work is to develop and validate a hybrid Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) algorithm capable of effective energy disaggregation under low-resolution data and approximate prior knowledge conditions. The object of study is the process of building electricity disaggregation from a single aggregate meter signal. The subject of study is appliance schedule optimization methods based on evolutionary computation. The proposed approach combines a Genetic Algorithm with a heuristic greedy filling stage. A priori appliance consumption patterns – user-provided or automatically extracted from historical data – serve as guiding biases in the fitness function. The algorithm operates in two sequential stages: first optimizing large consumers, then remaining flexible appliances. The method achieves 94.6% Overall Energy Accuracy on the public ECO dataset and 85.7% on real household data with approximate patterns, confirming practical applicability under data uncertainty conditions.

**Keywords**: non-intrusive load monitoring, energy disaggregation, genetic algorithm, energy efficiency.

**Вступ**. Детальний аналіз споживання електроенергії на рівні окремих пристроїв є ключовим завданням у контексті сталого розвитку та підвищення енергоефективності. Неінтрузивний моніторинг навантаження (NILM), концептуально запропонований Гартом [1], дозволяє визначати режими роботи побутових приладів шляхом аналізу лише загального сигналу споживання на вводі будівлі. Практичне впровадження NILM ускладнюється двома взаємопов'язаними чинниками: низьким розрізненням даних лічильників (зазвичай 15-хвилинні інтервали) та складністю отримання точних апріорних моделей приладів, особливо коли єдиним джерелом інформації є сам користувач [2]. Альтернативним напрямком є методи на основі комбінаторної оптимізації, зокрема генетичних алгоритмів [4]. Переважна більшість сучасних підходів – від прихованих марковських моделей до глибоких нейронних

мереж – вимагає значних обсягів розмічених архівних даних і високого розрізнення вхідного сигналу [3], що суттєво обмежує їх масштабованість.

**Мета роботи**. Розробка та валідація гібридного NILM-алгоритму, що ефективно виконує дезагрегацію енергії в умовах низького розрізнення даних та апроксимованих апріорних знань про прилади, а також обґрунтування його придатності як базового компонента для цифрових двійників та систем управління попитом на електроенергію.

**Постановка задачі**. При 15-хвилинному розрізненні одночасні або перекриваючі активації приладів зливаються в єдиний сигнал, унеможливлюючи класичне детектування подій [1]. Завдання трансформується з аналізу перехідних процесів у задачу енергетичного обліку та оптимізації розкладів. Додатковим ускладненням є неточність патернів, наданих користувачем: вони відображають суб'єктивне уявлення про роботу пристрою, а не його реальні характеристики. Отже, алгоритм має бути стійким до обох джерел невизначеності одночасно, що унеможливлює застосування підходів, що покладаються виключно на детектування подій або глибоке навчання [3].

**Вирішення проблеми**. На початковому етапі прилади класифікуються на фіксовані (scheduleValid=true, їхній розклад задано й не змінюється) та гнучкі (розклад підлягає оптимізації). Загальний виміряний сигнал агрегується по слотах методом максимуму: для кожного 15-хвилинного інтервалу береться найбільше зафіксоване значення потужності, що дозволяє точно відобразити піки короткочасних приладів. Далі з агрегованого сигналу віднімається сума відомих фіксованих навантажень, формуючи цільовий залишковий сигнал який є вхідним для оптимізації гнучких приладів:

$$P_{target}(t) = \max\left(0, P_{meas}(t) - \sum_i P_{fixed,i}(t)\right). \quad (1)$$

Для кожного гнучкого приладу з патерну виділяються два типи апріорних зміщень: "сильне" зміщення – допустимий діапазон потужності ±10% від пікового значення патерну, та "слабке" зміщення – множина переважних часових слотів, у яких потужність перевищує 50% від піку. Генетичний алгоритм (ГА) оптимізує розклади гнучких приладів, представляючи кожен розклад у вигляді хромосоми, де ген відповідає одному приладу та визначає момент початку і тривалість його роботи. При ініціалізації популяції з 10% імовірністю генерується нульова тривалість активації, що дозволяє алгоритму розглядати сценарій відсутності роботи приладу. Цільова функція мінімізує суму квадратів відхилень (SSE) між цільовим і відтвореним сигналами з урахуванням штрафів за відхилення від апріорних зміщень де $W_{penalty} = 0{,}2$ – емпірично підібраний ваговий коефіцієнт штрафу:

$$Cost = SSE + W_{penalty} \cdot Pen_{pattern}. \quad (2)$$

ГА виконується у два послідовних етапи: спочатку оптимізуються "великі" споживачі (потужність ≥400 Вт), після чого залишковий сигнал перераховується, і лише потім оптимізуються решта гнучких приладів. Така стадійність зменшує розмірність задачі та підвищує якість результату. Параметри ГА: 200 хромосом, максимум 3000 поколінь, турнірний відбір (розмір 3), ймовірності схрещування 0,8 та мутації 0,2, елітизм 2 особини, зупинка при стагнації протягом 25 поколінь.

На завершальному етапі жадібне заповнення покриває залишкові піки, що перевищують поріг 30 Вт. Прилади перебираються у порядку спадання номінальної потужності; при виборі значення потужності для слоту враховується відповідне значення патерну приладу (якщо доступне). Прилад призначається лише якщо його потужність не менш ніж удвічі перевищує залишок, а максимальне перевищення не більше 25 Вт. Це дозволяє врахувати споживання, яке не вдалося пояснити структурованою оптимізацією ГА.

**Результати**. Алгоритм перевірено на двох наборах даних. На публічному наборі ECO [2] з автоматично вилученими патернами середня точність енергетичного балансу (OEA) склала 94,6%, а медіанне значення – 94,7%. Макро-усереднений показник F1 для розпізнавання стану приладів дорівнює 0,440, середня абсолютна похибка – 10,40 Вт. Такий рівень F1 відображає пріоритет методу: точний енергетичний облік, а не посекундне

відстеження стану [5]. Сума відтвореної енергії (2855,93 Вт·год) близька до реальної (3028,08 Вт·год), що підтверджує якість дезагрегації (рис. 1).

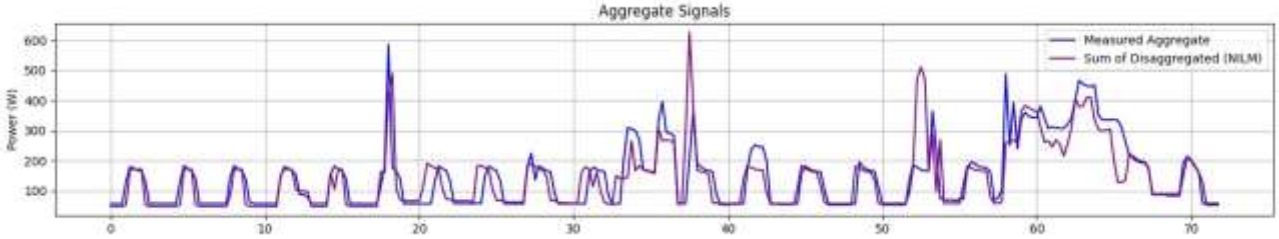



Рис. 1. Порівняння виміряного та відновленого агрегованого сигналу (набір ECO)

Якісний аналіз по ECO показав, що алгоритм відмінно відтворює прилади з повторюваними циклічними патернами (холодильник, мікрохвильова піч) та прилади тривалого використання (розважальна система). Труднощі виникають з приладами коротких і спорадичних активацій (кавомашина) – це закономірне обмеження будь-якого NILM-методу на 15-хвилинному розрізненні [2]. Високу точність ідентифікації демонструють прилади, реальний патерн споживання яких збігається з наданим апріорним профілем.

На реальних даних домогосподарства з суб'єктивними патернами, наданими мешканцями, OEA склала 85,74%. Відхилення у бік завищеної прогнозованої енергії (13365 Вт·год проти реальних 11697 Вт·год) зумовлено узагальненістю наданих патернів та схильністю жадібного заповнення відносити фоновий шум до відомих приладів. Незважаючи на це, результат підтверджує функціональну придатність методу за умови неточного апріорного опису та його практичну цінність для систем цифрових двійників.

**Висновок**. Запропонований гібридний підхід ГА + жадібне заповнення є прийнятною альтернативою глибоконавчальним NILM-методам. Його головна перевага – незалежність від масивів розмічених архівних даних: замість дорогого збору та розмітки даних алгоритм задовольняється апроксимованими апріорними патернами, що суттєво знижує вартість та складність розгортання [3]. Продемонстрована стійкість до невизначеності вхідних даних робить метод перспективним базовим компонентом для цифрових двійників будівель та систем управління попитом. Напрямки подальших досліджень включають вдосконалення механізмів виявлення невідомих приладів, покращення обробки короткочасних навантажень та підвищення обчислювальної ефективності ГА для застосувань реального часу.

## Список використаних джерел


1. Hart, G. W. (1992). Nonintrusive appliance load monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 80(12), 1870–1891. https://doi.org/10.1109/5.192069
2. Beckel, C., Kleiminger, W., Cicchetti, R., Staake, T., Santini, S. (2014). The ECO data set and the performance of non-intrusive load monitoring algorithms. *1st ACM Int. Conf. on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings (BuildSys '14)*, ACM, pp. 80–89. https://doi.org/10.1145/2674061.2674064
3. Kaselimi, M., Voulodimos, A., Protopapadakis, E., Doulamis, N., Doulamis, A. (2022). Towards trustworthy energy disaggregation: a review of challenges, methods, and perspectives for non-intrusive load monitoring. *Sensors*, 22(15), 5872. https://doi.org/10.3390/s22155872
4. Ajani, O. S., Kumar, A., Mallipeddi, R., Das, S., & Suganthan, P. N. (2022). Benchmarking optimization-based energy disaggregation algorithms. *Energies*, 15(5), 1600. https://doi.org/10.3390/en15051600
5. Mayhorn, E., Butzbaugh, J., & Meier, A. (2023). A field study of nonintrusive load monitoring devices and implications for load disaggregation. *Sensors*, 23(19), 8253. https://doi.org/10.3390/s23198253

# ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ 3D-МОДЕЛЕЙ ВІДСКАНОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

**Мацепа С.М., Коваленко Ю.І., Хижняк Є.В., Паламарчук Д.О., Лега А.Ю., Шматков В.Ю.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто застосування нейромережевих методів для аналізу 3D-моделей відсканованих деталей, зокрема деталей, виготовлених із використанням технологій 3D-друку. Основну увагу приділено представленню 3D-сканів у вигляді хмар точок, їх попередній обробці та використанню спеціалізованих архітектур глибинного навчання для класифікації та сегментації дефектних ділянок. Показано, що моделі PointNet та DGCNN можуть бути використані для автоматизованого аналізу просторових даних, а результати такого аналізу можуть слугувати основою для подальшого формування рекомендацій щодо коригування параметрів технологічного процесу 3D-друку.

**Ключові слова:** 3D-сканування, хмара точок, нейронна мережа, дефекти 3D-друку.

# APPLICATION OF NEURAL NETWORK METHODS FOR ANALYSIS OF 3D MODELS OF SCANNED PARTS

**Matsepa S.M., Kovalenko Yu.I., Khyzhniak Ye.V., Palamarchuk D. O., Leha A.Yu., Shmatkov V.Yu.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper considers the application of neural network methods for the analysis of 3D models of scanned parts, in particular parts manufactured using 3D printing technologies. The main attention is paid to representing 3D scans as point clouds, their preprocessing, and the use of specialized deep learning architectures for classification and segmentation of defective areas. It is shown that PointNet and DGCNN models can be applied for automated analysis of spatial data, while the obtained results can be further used to generate recommendations for adjusting the parameters of the 3D printing process.

**Keywords:** 3D scanning, point cloud, neural network, 3D printing defects.

**Вступ.** У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості особливого значення набувають цифрові технології автоматизованого контролю якості виготовлених деталей. Особливо це стосується виробів, створених за допомогою адитивних технологій, де точність геометрії та відповідність проектним параметрам є критично важливими. Одним із ефективних інструментів отримання інформації про фактичну форму та геометричні характеристики готового виробу є 3D-сканування. Ця технологія дозволяє отримати детальну цифрову модель об’єкта, яка може бути використана для подальшого аналізу, порівняння з еталонною моделлю та виявлення можливих геометричних відхилень або дефектів. [1-2].

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення ефективності процесу контролю якості деталей, виготовлених за допомогою технологій 3D-друку, шляхом застосування автоматизованих методів аналізу тривимірних сканів, а також є формування рекомендацій щодо усунення причин виникнення виявлених дефектів, з урахуванням параметрів технологічного процесу 3D-друку.

**Постановка задачі.** Відомо, що використання технологій 3D-сканування дозволяє отримувати точні цифрові моделі виробів та аналізувати їх геометричні характеристики. Однак значні обсяги просторових даних і складність геометрії деталей ускладнюють процес виявлення дефектів традиційними методами аналізу. Ручна або напівавтоматична обробка результатів 3D-сканування потребує значних часових витрат та залежить від досвіду спеціаліста, що знижує ефективність і відтворюваність контролю якості. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї задачі є застосування нейромережевих методів,

здатних ефективно працювати з тривимірними моделями та хмарами точок. Такі методи дозволяють автоматично ідентифікувати характерні ознаки дефектів, виконувати класифікацію пошкоджень та сегментацію дефектних ділянок поверхні.

**Вирішення проблеми.** Адитивне виробництво, зокрема технології 3D-друку, характеризується значними перевагами порівняно з традиційними методами виготовлення деталей. До основних з них належать висока гнучкість проєктування, можливість швидкого внесення змін до конструкції, економія матеріалів, а також здатність виготовляти вироби зі складною просторовою геометрією, які часто неможливо або економічно недоцільно отримати за допомогою класичних технологій обробки. Разом із тим специфіка пошарового формування виробів зумовлює появу ряду характерних дефектів і деформацій. Ці недоліки можуть суттєво впливати на геометричну точність, механічну міцність, стабільність форми та експлуатаційні властивості готових виробів. Нерівномірність формування шарів, зміна температурного режиму під час друку та особливості затвердіння матеріалу часто призводять до накопичення внутрішніх напружень і погіршення якості поверхні.

Одним із найбільш поширених видів дефектів є геометричні відхилення від заданої (номінальної) форми виробу. Вони можуть проявлятися у вигляді викривлення поверхонь, появи локальних деформацій, перекосу елементів конструкції або порушення симетрії деталі. Подібні дефекти здебільшого виникають унаслідок нерівномірного охолодження матеріалу, формування залишкових термічних напружень, недостатньої адгезії між шарами, а також через неправильний вибір або налаштування параметрів друку – температури екструзії, швидкості подачі та переміщення матеріалу, товщини шару чи умов охолодження.

Таблиця 1

**Типові дефекти 3D-друку та їх прояви у 3D-моделі**

| Тип дефекту | Прояв у 3D-моделі | Можлива причина виникнення |
|---|---|---|
| Викривлення / warping | Відхилення країв або площин від номінальної форми | Нерівномірне охолодження, слабка адгезія до платформи |
| Поверхневі нерівності | Локальні нарости, хвилястість або провали | Нестабільна подача матеріалу, вібрації, похибки калібрування |
| Деформація отворів | Спотворення круглих або технологічних елементів | Неточність підтримок, перегрів або технологічні обмеження друку |
| Розшарування | Порушення цілісності між шарами | Недостатня температура екструзії або надмірна швидкість друку |

Для автоматизованого аналізу 3D-моделей відсканованих деталей доцільно використовувати подання просторових даних у вигляді хмар точок [2-3]. Такий формат безпосередньо описує геометрію об’єкта набором координат у тривимірному просторі та може бути отриманий як із реального 3D-скану, так і з CAD-моделі під час підготовки навчального набору даних. Попередня обробка включає фільтрацію шумів, нормалізацію координат, приведення кількості точок до єдиного формату та, за потреби, розмітку дефектних зон.

У межах нейромережевого аналізу базовою моделлю може виступати PointNet, яка працює з невпорядкованими множинами точок і забезпечує інваріантність до перестановки елементів хмари. Для задач локалізації дефектів більш доцільним є застосування DGCNN, оскільки ця модель формує граф зв’язків між точками та враховує локальну геометрію поверхні. Саме локальний контекст є важливим під час виявлення таких дефектів, як викривлення, поверхневі нерівності, локальні западини, деформації отворів або розшарування. В таблиці 2 наведено основні нейромережеві методи аналізу 3D-моделей .

Підготовка навчальних даних може виконуватися на основі CAD-моделей із подальшим формуванням синтетичних дефектів. Це дозволяє отримати контрольований набір прикладів, у якому відомі нормальні та дефектні ділянки. Після навчання

нейромережева модель може використовуватися для класифікації стану деталі або для сегментації окремих точок, що належать до дефектної області [3-4].

Таблиця 2

**Порівняння нейромережевих методів аналізу 3D-моделей**

| Метод | Вхідні дані | Призначення | Особливості застосування |
|---|---|---|---|
| PointNet | Хмара точок | Класифікація та первинний аналіз 3D-об'єктів | Добре працює з невпорядкованими точками, але обмежено враховує локальну геометрію |
| PointNet++ | Хмара точок | Аналіз локальних областей поверхні | Дозволяє враховувати локальний контекст, але потребує більших обчислювальних ресурсів |
| DGCNN | Хмара точок / граф | Сегментація дефектних ділянок | Враховує зв'язки між сусідніми точками та придатна для аналізу локальних дефектів |
| Autoencoder | Хмара точок / вокселі | Виявлення аномалій | Може навчатися на прикладах деталей без дефектів і виявляти відхилення за похибкою реконструкції |

Отримані результати аналізу можуть бути використані не лише для візуального контролю якості, а й для подальшого формування рекомендацій щодо коригування параметрів технологічного процесу. Зокрема, за типом і локалізацією дефекту можна визначати ймовірні причини його виникнення та пропонувати зміни температурного режиму, швидкості друку, параметрів охолодження або налаштувань адгезії. Детальне розкриття системи рекомендацій доцільно винести в окремі тези або повноцінну статтю.

**Висновок.** У ході проведеного дослідження було встановлено, що застосування нейромережевих методів для аналізу 3D-моделей відсканованих деталей є перспективним напрямом розвитку автоматизованих систем контролю якості у сфері адитивного виробництва. Представлення результатів 3D-сканування у вигляді хмар точок забезпечує зручний формат для збереження просторової інформації про геометрію виробу, проте нерегулярна структура таких даних потребує використання спеціалізованих алгоритмів та архітектур глибинного навчання. Використання таких підходів дозволяє підвищити швидкість та об'єктивність аналізу результатів 3D-сканування, а також створює передумови для впровадження інтелектуальних систем контролю якості деталей, виготовлених методом 3D-друку.

**Список використаних джерел**


1. Singh D. P., Yadav M. Deep learning-based semantic segmentation of three-dimensional point cloud: a comprehensive review. International Journal of Remote Sensing. 2024. Vol. 45, № 2. P. 532–586. DOI: 10.1080/01431161.2023.2297177.
2. Petrov D., Gadelha M., Mech R., Kalogerakis E. ANISE: Assembly-Based Neural Implicit Surface Reconstruction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2024. Vol. 30, № 8. P. 4514–4526. DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247078.
3. Huo L., Liu Y., Yang Y. Review: Research on product surface quality inspection technology based on 3D point cloud. Advances in Mechanical Engineering. 2023. Vol. 15, № 4. DOI: 10.1177/16878132231159523.
4. Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A., Bradbury J., Chanan G., Killeen T., Lin Z., Gimelshein N., Antiga L., Desmaison A., Kopf A., Yang E., DeVito Z., Raison M., Tejani A., Chilamkurthy S., Steiner B., Fang L., Bai J., Chintala S. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. Advances in Neural Information Processing Systems. 2019. Vol. 32.

# ЕМПІРИЧНА ПЕРЕВІРКА ГІПОТЕЗИ АСИМЕТРІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЦІННОСТІ ВІДПОВІДЕЙ YES/NO В ІНТЕРАКТИВНІЙ ДІАГНОСТИЦІ

**Мельник М.О., Бичков О.С., Петрівський В.Я.**
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

**Анотація**. Представлено результати масштабного емпіричного дослідження асиметричної інформаційної цінності двійкових відповідей YES/NO у задачах інтерактивної діагностики. На трьох відкритих Kaggle-датасетах симптом–хвороба, чотирьох ймовірнісних моделях (Bernoulli NB, Logistic Regression, Random Forest, Histogram Gradient Boosting) та двох стратегіях вибору питань (Expected Information Gain та Differential) виконано 36000 пар крок-замірів. Виявлено суттєву та статистично значущу асиметрію: медіана скорочення ентропії після YES перевищує медіану після NO у 96,8 раза (Mann–Whitney $p < 10^{-3}$, Cliff's $\delta = 0{,}616$ – великий розмір ефекту); Top-1 ранжування суттєво стабільніше після NO (0,97–0,99), ніж після YES (0,72–0,91). Виявлено хвіст «Critical NO» – близько 0,5% NO-відповідей із високою інформаційною цінністю через велике покриття діагностичного питання серед поточних топ-кандидатів. Отримані результати дають емпіричне обґрунтування архітектурного патерну Iterative Refinement Funnel (YES → RESTART, NO → CONTINUE, Critical NO → RESTART), який скорочує обчислювальні витрати інтерактивних діагностичних систем без втрати якості ранжування.

**Ключові слова***:* інтерактивна діагностика; активне навчання; інформаційна теорія; ентропія Шеннона; інформаційний приріст; ранжування гіпотез; Iterative Refinement Funnel; Critical NO.

# EMPIRICAL TESTING OF THE HYPOTHESIS OF ASYMMETRY OF THE INFORMATIONAL VALUE OF YES/NO ANSWERS IN INTERACTIVE DIAGNOSTICS

**Melnyk M.O. [1], Bychkov O.S. [1], Petrivskyi V.Y. [1]**
[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The results of a large-scale empirical study of the asymmetric information value of binary YES/NO answers in interactive diagnostic tasks are presented. 36,000 pairs of step-measurements were performed on three open Kaggle symptom-disease datasets, four probabilistic models (Bernoulli NB, Logistic Regression, Random Forest, Histogram Gradient Boosting), and two question selection strategies (Expected Information Gain and Differential). A significant and statistically significant asymmetry was found: the median entropy reduction after YES exceeds the median after NO by 96.8 times (Mann–Whitney $p < 10^{-3}$, Cliff's $\delta = 0.616$ - large effect size); Top-1 ranking is significantly more stable after NO (0.97–0.99) than after YES (0.72–0.91). A “Critical NO” tail was identified – about 0.5% of NO answers with high information value due to the large coverage of the diagnostic question among the current top candidates. The obtained results provide empirical justification for the Iterative Refinement Funnel architectural pattern (YES → RESTART, NO → CONTINUE, Critical NO → RESTART), which reduces the computational costs of interactive diagnostic systems without losing the quality of ranking.

**Keywords***:* interactive diagnostics; active learning; information theory; Shannon entropy; information gain; hypothesis ranking; Iterative Refinement Funnel; Critical NO.

**Вступ і постановка задачі.** Інтерактивні діагностичні системи (медичні симптом-чекери, технічна підтримка, юридична класифікація) послідовно звужують простір гіпотез шляхом запитань про ознаки. Класичний підхід «найінформативнішого питання» формалізують як максимізацію очікуваного скорочення ентропії [1, 4]. Однак повний перерахунок постеріору після кожної відповіді обчислювально дорогий, що стимулює пошук евристичних архітектурних оптимізацій. Серед них – патерн Iterative Refinement Funnel (IRF), у якому повний перерахунок виконується лише після YES, а NO-відповіді обробляються дешевими локальними оновленнями.

Інженерна теза «NO у середньому слабко звужує гіпотези» потребує академічної валідації – як кількісної (наскільки), так і якісної (коли NO стає інформаційно сильним

сигналом). Метою цієї роботи є відтворюване емпіричне обґрунтування цієї тези на відкритих даних та ідентифікація умов виникнення «Critical NO».

**Методика експерименту.** Нехай $H = \{h_1, h_2, \dots, h_D\}$ – скінченна множина гіпотез (класів), $S = \{s_1, s_2, \dots, s_S\}$ – множина бінарних ознак (симптомів). Сесія діалогу – послідовність питань $q_t$ про ознаку та відповідей $a_t \in \{YES, NO\}$, які оновлюють розподіл імовірностей гіпотез за Байєсом (1):

$$p_t(h|E_t) = \frac{p(e_t|h)p_{t-1}(h|E_{t-1})}{p(e_t|E_{t-1})}. \quad (1)$$

Інформаційний приріст кроку вимірюємо як скорочення ентропії Шеннона (2)-(3) [1-3]:

$$\Delta H_t = H(p_{t-1}) - H(p_t), \quad (2)$$

$$H(p) = -\sum_{h \in H} p(h) \log_2 p(h). \quad (3)$$

Додатково записуємо ΔTopK (зміну маси Top-K), Top-1 stability, Jaccard@K та операційну метрику покриття питання серед поточних топ-кандидатів (4):

$$coverage(q) = \frac{\left|\{h \in Top - K : p(x_q = 1|h) > 0.5\}\right|}{K}. \quad (4)$$

**Дані**. Використано три відкриті Kaggle-набори (приклади × симптоми × класи): kaushil268 (4920 × 132 × 41), itachi9604 (4920 × 131 × 41) та abhishekgodara (246 945 × 377 × 713). Усі набори уніфіковано до бінарної матриці симптомів і вектора класів; відсутні ознаки трактуються як 0 згідно з конвенцією базової роботи. Розбиття train/test = 80/20 з фіксованим seed = 42.

**Моделі**. Натреновано чотири ймовірнісні класифікатори: Bernoulli Naive Bayes, Logistic Regression, Random Forest (200 дерев), Histogram Gradient Boosting [5]. Для LR і RF застосовано ізотонічну калібрацію через CalibratedClassifierCV. Постеріор для NB обчислюється строгим Байєсом по відомих ознаках; для решти моделей – підстановкою 0 на невідомих ознаках і викликом predict_proba.

Стратегії питань. (a) EIG – argmax очікуваного скорочення ентропії на підвибірці 30 ще-не-запитаних ознак (5)-(6):

$$EIG(q) = H(p) - \sum_{v \in \{0.1\}} p(x_q = v) H(p|x_q = v), \quad (5)$$

$$Differential - \text{argmax}\left|p\left(x\middle|h_{top1}\right) - p(x|h_{top2})\right|. \quad (6)$$

**Симуляція**. На кожній з 24 комбінацій (3 датасети × 4 моделі × 2 стратегії) запущено 100 тестових сесій. Кожна сесія ініціалізується розкриттям 2 випадкових позитивних симптомів і виконує до 15 кроків діалогу із записом усіх метрик на кожен крок. Сумарно: 36 000 step-pairs (n_YES = 6162; n_NO = 29 838). Реалізація – Python 3.11, scikit-learn 1.8; управління середовищем – uv (Astral); код і артефакти експерименту відкриті.

**Результати та статистичний аналіз.** Глобально медіана ΔH(YES) = 0,0415, медіана ΔH(NO) = 0,0000; відношення Ratio = Med(Y) / Med(N) = 96,81. Тест Манна–Уітні (одностороння альтернатива Y > N) дає $p < 10^{-3}$, Cliff's δ = 0,616 – «великий» ефект. Розподіли ΔEntropy для YES та NO зображено на Рис. 1: коробка YES помітно зміщена вгору, тоді як для NO маса сконцентрована біля нуля.

Асиметрія підтверджується для 23 з 24 комбо (для hgb/eig на abhishekgodara метрика невизначена через відсутність YES-відповідей у симуляції). У 17 з 23 визначених комбо Cliff's δ перевищує поріг «великого» ефекту 0,474; для abhishekgodara – до 0,99 у LR/Differential та LR/EIG, що відображає більшу складність класифікаційного простору (713

класів). Узагальнено результат наведено на Рис. 2. Усі визначені значення додатні; пунктирна лінія – δ = 0,474 (поріг «великого» ефекту за Romano).

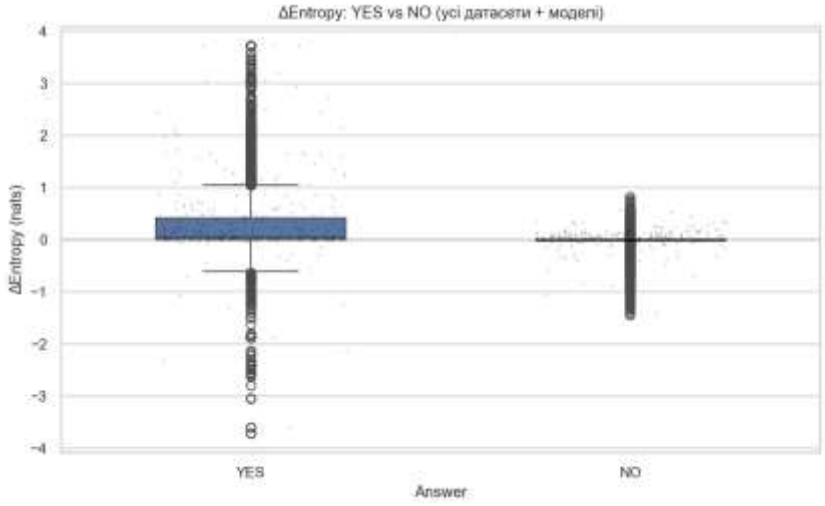



Рис. 1. Розподіли ΔEntropy для відповідей YES та NO (36 000 крок-замірів, всі датасети та моделі). Шкала логарифмічна за віссю Y

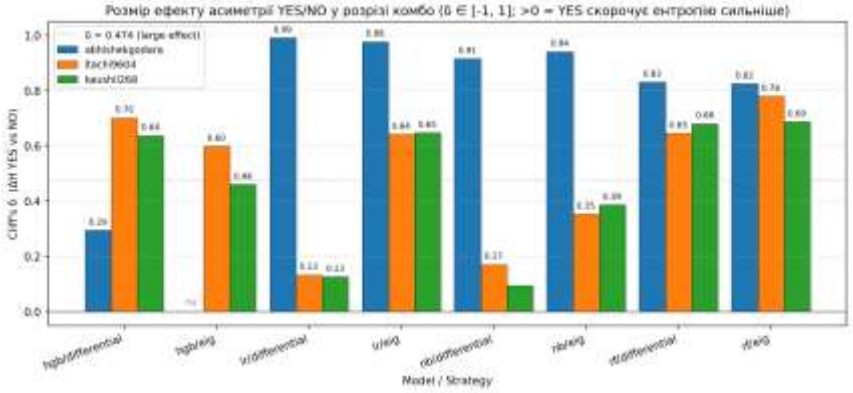



Рис. 2. Cliff's δ у розрізі комбінацій (модель × стратегія) для кожного з 3 датасетів

**Стабільність ранжування**. Top-1 стабільність після NO становить 0,97–0,99 в усіх датасетах, тоді як після YES – лише 0,72–0,91. Це безпосередньо валідує інженерну логіку IRF: YES «ламає» поточного лідера ранжування, тоді як NO здебільшого лише обрізає хвости розподілу.

Critical NO. За критерієм coverage(q) ≥ 0,5 «критичних» NO виявлено 0,5 % від 29 838 NO-відповідей; за квантильним критерієм (ΔH(NO) ≥ 95-й перцентиль розподілу YES) – 0,0 %. Хвіст інформаційно сильних NO існує, але невеликий і піддається явній детекції через coverage(q) – без обчислювально дорогого повного перерахунку. Результат узгоджується з теорією доказової медицини: негативні свідчення мають значний діагностичний ефект лише за специфічних характеристик тесту (LR− далеко від 1).

**Висновки та архітектурні рекомендації.** У результаті проведеного дослідження можна зробити висновки:

1. Гіпотезу асиметрії інформаційної цінності відповідей YES/NO підтверджено емпірично на 3 з 3 датасетів та всіх 4 моделях ($p_{MW} < 10^{-3}$; Cliff's δ = 0,616). Медіана скорочення ентропії після YES перевищує таку для NO у 96,8 раза.

2. Ранжування Top-1 суттєво стабільніше після NO (0,97–0,99), ніж після YES (0,72–0,91), що валідує доцільність обробки NO «без перерахунку» в патерні IRF.

3. Хвіст «Critical NO» становить ≈0,5 % NO-відповідей і піддається явній детекції через coverage(q) – без необхідності повного Байєсівського оновлення, що робить виняткову гілку IRF обчислювально малозатратною.

4. Архітектурний патерн IRF (YES → RESTART, NO → CONTINUE, Critical NO → RESTART) отримав емпіричне обґрунтування і збереже якість ранжування за умови коректного підбору порогу $\tau_{crit}$ для coverage. Подальші напрями: введення стохастичного шуму у відповіді користувача, додаткова cluster-стратегія, оцінка кумулятивної точності діагностики на горизонті 15 кроків.

**Список використаних джерел**


1. Neuhoff D. L. Maximizing Entropy with an Expectation Constraint and One-Parameter Exponential Families of Distributions: A Reexamination. *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*. 2024. Vol. 21, no. 5. P. 589-846. URL: https://doi.org/10.1561/0100000132.
2. Haroutunian M., Gharagyozyan G. Information Theory Tools and Techniques to Overcome Machine Learning Challenges. *Mathematical Problems of Computer Science*. 2025. Vol. 63. P. 25-41. URL: https://doi.org/10.51408/1963-0129.
3. Exploring the Intersection of Information Theory and Machine Learning / Y. Jaradat et al. *The International Arab Journal of Information Technology*. 2025. Vol. 22, no. 5. URL: https://doi.org/10.34028/iajit/22/5/1.
4. Predictable Reinforcement Learning Dynamics through Entropy Rate Minimization / D. J. Ornia et al. *Transactions on Machine Learning Research (TMLR)*. 2025. No. 6. P. 46-58. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.18703.
5. Aguilar J. A. H., Pérez Y. H. Machine Learning in Python Fundamentals. *12th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS)*. 2023. URL: https://doi.org/10.1109/CIMPS61323.2023.10528831.
6. Disease Prediction Using Machine Learning : Kaggle dataset / kaushil268. URL: https://www.kaggle.com/datasets/kaushil268/disease-prediction-using-machine-learning (дата звернення: 01.05.2026).
7. Disease Symptom Description Dataset : Kaggle dataset / itachi9604. URL: https://www.kaggle.com/datasets/itachi9604/disease-symptom-description-dataset (дата звернення: 01.05.2026).

# AI-АСИСТЕНТИ У БЕЗПЕЧНІЙ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ВИКЛИКИ, РИЗИКИ ТА ОСВІТНІ НАСЛІДКИ

**Moskov V.[1], Беркунський Є.Ю.[2], Павленко А.Ю.[2], Беркунський О.Є.[2]**
[1]Academy of Economics and Pedagogy, Prague, Czech Republic
[2]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

**Анотація**. У роботі досліджено, як AI асистенти впливають на безпеку програмного забезпечення та як їх використовують у професійній роботі. Опитування 75 IT-спеціалістів різних ролей і галузей показало, що ШІ часто використовується для генерації коду, моделювання загроз і пошуку вразливостей, поступово замінюючи традиційні джерела (StackOverflow та ін.) чи пошукові системи. Результати демонструють подвійний ефект: інструменти ШІ пришвидшують роботу і зменшують рутинні завдання, але також несуть ризики, такі як вразливий код і витоки даних. Помірний рівень довіри у поєднанні з ретельною перевіркою результатів ШІ демонструє критичне ставлення до технології, і деякі респонденти демонструють «парадокс довіри», поєднуючи високу довіру з високою обізнаністю про ризики. Архітектори найбільше довіряють ШІ, тоді як тестувальники – найменше, що відповідає їхній увазі до виявлення дефектів. Результати визначають необхідність розробки політик безпечного використання ШІ та стандартів перевірки згенерованого коду. Для освіти вони демонструють важливість додавання модулів з грамотності в ШІ, оцінці ризиків і критичного аналізу результатів ШІ до програм IT-досліджень, щоб підготувати спеціалістів до безпечного та відповідального використання штучного інтелекту.

**Ключові слова**: AI асистент; безпека ПЗ; Claude; ChatGPT; Copilot; Gemini; галюцинації; безпечна розробка; тестування; освіта.

# AI ASSISTANTS IN SECURE SOFTWARE DEVELOPMENT: CHALLENGES, RISKS AND EDUCATIONAL IMPLICATIONS

**Moskov V.[1], Berkunskyi Ye.[2], Pavlenko A.[2], Berkunskyi O.[2]**
[1]Academy of Economics and Pedagogy, Prague, Czech Republic
[2]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

**Abstract**. This study examines how AI assistants affect software security and how they are used in professional work. A survey of 75 IT specialists from different roles and industries showed that AI is often used for code generation, threat modeling, and finding vulnerabilities, while slowly replacing traditional sources like StackOverflow or search engines. The results show a double effect: AI tools make work faster and reduce routine tasks, but they also bring risks such as vulnerable code and data leaks. The moderate trust level combined with careful checking of AI outputs shows a critical attitude toward the technology, and some respondents show a “trust paradox,” combining high trust with high awareness of risks. Architects trust AI the most, while QA specialists trust it the least, which matches their focus on defect detection. These findings highlight the need for company policies on safe AI use and standards for checking generated code. For education, they show the importance of adding modules on AI literacy, risk assessment, and critical analysis of AI outputs into IT study programs to prepare future specialists for safe and responsible use of artificial intelligence.

**Keywords**: AI assistant; software security; Claude; ChatGPT; Copilot; Gemini; hallucinations; secure development; testing; education.

**Вступ**. Використання AI-асистентів впливає на безпеку програмного забезпечення (ПЗ) та є однією із важливих проблем досліджень серед наукової спільноти. Попередні роботи [1] засвідчили, що інструменти на основі великих мовних моделей (LLM), зокрема GitHub Copilot, здатні генерувати вразливий код у значній частині безпеково критичних завдань, що підтверджує актуальність проблеми. Для визначення ролі та практик використання AI-асистентів було проведено опитування 75 розробників ПЗ, а також тестувальників і техлідерів. Результати показали, що ШІ активно застосовується для генерації коду, моделювання загроз і пошуку вразливостей, попри загальну недовіру до їхніх відповідей. Також вони все частіше замінюють традиційні джерела (StackOverflow та ін.) чи пошукові

системи, створюючи ризик надмірної довіри до згенерованих рішень і підкреслює необхідність формування політик безпечного використання та освітніх заходів для ІТ фахівців.

**Мета роботи**. Дослідження впливу AI-асистентів та виявлення викликів і ризиків, пов'язаних із застосуванням генеративних систем у безпеково критичних процесах, а також на розробку рекомендацій щодо підготовки та підвищення кваліфікацій ІТ фахівців.

**Постановка задачі**. Стрімкий розвиток генеративних систем штучного інтелекту та їх інтеграція у професійні середовища відкрили нові можливості для автоматизації процесів розробки ПЗ, але водночас створили низку ризиків, особливо у сфері безпеково критичних процесів. Попри загальну недовіру до стабільності та якості відповідей ШІ, розробники все більше використовують AI-асистенти у створенні модулів програмних систем, навіть ті, що мають критичне значення для безпеки [2o]. Такі інструменти сприймаються як авторитетне джерело порад, що підвищує ризик надмірної довіри навіть до рішень із помилками чи галюцинаціями. У цих умовах виникає потреба у комплексному аналізі впливу AI-асистентів на безпеку ПЗ та у визначенні освітніх заходів, спрямованих на формування навичок критичної оцінки згенерованого коду й розвиток відповідальних практик використання ШІ.

**Вирішення проблеми**. Дослідження «Використання ШІ у роботі ІТ-фахівців» показало, що аудиторія опитування охоплює широкий спектр ІТ-фахівців – від молодих фахівців (досвід < 1 року) до досвідчених (досвід >10 років) архітекторів і техлідерів, які працюють у різних галузях (продуктові компанії, фінтех, GameDev, Enterprise). Це дозволяє оцінити вплив ШІ-асистентів на безпеку й ефективність розробки, тестування та супровід ПЗ з різних професійних перспектив, рис.1.

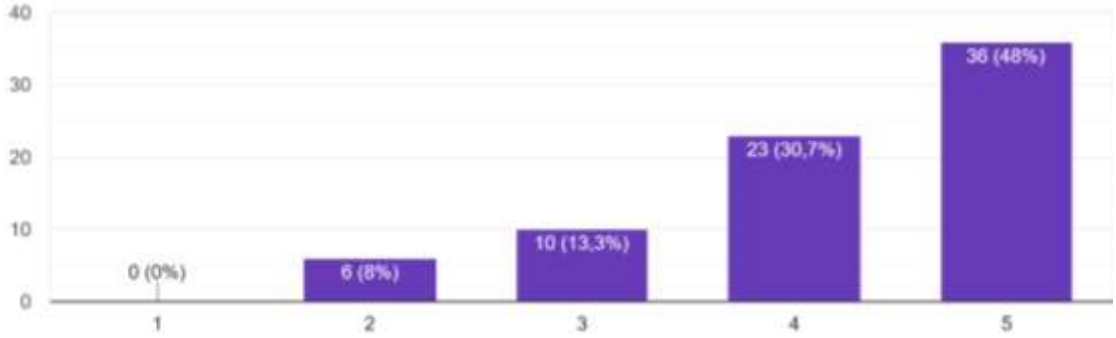



Рис. 1. Розподіл частоти використання ШІ серед респондентів (1 – ніколи, 5 – щодня)

Таким чином, всі розробники так чи інакше використовують інструменти ШІ, більшість із них використовують ШІ-асистенти як інструмент для прискорення та оптимізації робочих процесів. Відповіді показують, що найчастіше ШІ застосовується для генерації коду, його рефакторингу, написання тестів та пошуку помилок, тобто для тих завдань, які безпосередньо впливають на швидкість і якість розробки. Інструменти ШІ активно використовуються для аналізу логів, створення документації та проведення code review, що допомагає зменшити рутинне навантаження й підвищити продуктивність командної роботи. Не менш важливим напрямом є використання ШІ у прийнятті архітектурних рішень, моделюванні загроз та плануванні задач, що характерно для техлідів та архітекторів. Як наслідок, головною метою використання ШІ є пришвидшення, спрощення та автоматизація процесу розробки, навіть попри загальну недовіру до стабільності та точності його відповідей.

Опитування ІТ-фахівців засвідчило помірний рівень довіри до відповідей ШІ-асистентів, який у середньому становить 3 з 5 балів, при цьому ретельність перевірки результатів є значно вищою – 4,47 бала. Така комбінація свідчить про критичне й обережне ставлення до використання інструментів на основі LLM. Більшість респондентів демонструють середній рівень довіри (48%), тоді як низький рівень (25,3%) та високий рівень (лише 1,3%) є менш поширеними, що підтверджує зважений підхід до оцінки технології. Виявлено статистично незначущу негативну кореляцію між довірою та

ретельністю перевірки (–0,19), ті, хто більше довіряє ШІ, менш схильні перевіряти його результати.

Респонденти високо оцінюють ризики, пов'язані з використанням ШІ: найбільше занепокоєння викликає ймовірність генерації вразливого коду (3,63) та витоку даних (3,63), тоді як ризик галюцинацій (3,33) та помилок у коді (3,17) також залишається суттєвим. Група учасників (10,7%) продемонструвала «парадокс довіри»: поєднання високої довіри до ШІ (4–5 балів) із високим рівнем усвідомлення ризиків (4–5 балів). Це свідчить про сприйняття ШІ як корисного інструменту, що водночас потребує контролю.

Аналіз за професійними ролями показав, що архітектори мають найвищий рівень довіри (3,67), тоді як QA-спеціалісти – найнижчий (2,63), що узгоджується з їхньою функцією пошуку дефектів. Крім того, більш досвідчені фахівці (>10 років у галузі) схильні довіряти ШІ більше, ніж молодші колеги, що можна пояснити більш ретельним формулюванням запитів до LLM. Розподіл рівнів довіри опитуваних до відповідей ШІ-асистентів подано на рис. 2, де кожен сегмент відображає частку респондентів із відповідним рівнем оцінки.

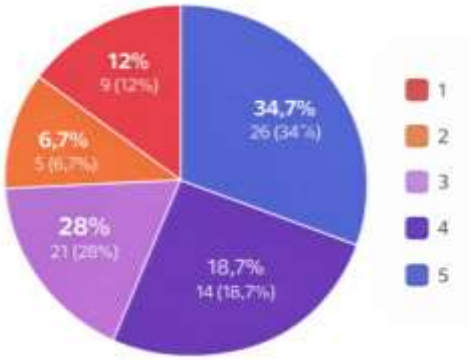



Рис. 2. Розподіл респондентів згідно ступені їх готовності пройти навчання з безпечного використання ШІ (1 – не бажають, 5 – бажають)

Найбільша частка респондентів (34,7%) продемонструвала високий рівень довіри (5 балів), тоді як середній рівень (3 бали) становить 28%, а низький – лише 6,7%. Це свідчить про поступове зростання прийняття технології серед професійної спільноти, хоча значна частина учасників зберігає критичне ставлення. Візуалізація підтверджує, що довіра до ШІ є неоднорідною: поряд із групою прихильників існує помітна частка користувачів, які оцінюють його роботу скептично, що підкреслює потребу у формуванні політик безпечного використання та розвитку навичок критичної оцінки результатів генерації.

**Висновок**. У ході дослідження було встановлено, що використання AI-асистентів у розробці ПЗ має подвійний характер: вони підвищують ефективність роботи, прискорюють процеси генерації та перевірки коду, тестування й пошуку помилок, а також зменшують рутинне навантаження, проте водночас створюють ризики, серед яких найбільше занепокоєння викликають генерація вразливого коду та витік даних; критичне ставлення до технології проявляється через помірний рівень довіри та ретельність перевірки результатів, а «парадокс довіри» підтверджує сприйняття ШІ як корисного інструменту, що потребує постійного контролю; практичні наслідки полягають у розробці корпоративних політик безпечного використання та стандартів перевірки коду, а для освітньої сфери – у впровадженні модулів з AI-грамотності, оцінки ризиків і критичного аналізу результатів у навчальні програми спеціальностей галузі F «Інформаційні технології».

## Список використаних джерел

1. Perry, N., Srivastava, M., Kumar, D., & Boneh, D. (2023, November). Do users write more insecure code with ai assistants?. In Proceedings of the 2023 ACM SIGSAC conference on computer and communications security, pp. 2785-2799. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.03622.
2. Klemmer, J. H., Horstmann, S. A., Patnaik, N., Ludden, C., Burton Jr, C., Powers, C., ... & Fahl, S. (2024, December). Using ai assistants in software development: A qualitative study on security practices and concerns. In Proceedings of the 2024 on ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 2726-2740. DOI: https://doi.org/10.1145/3658644.3690283.

# ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ШІ-ТЕКСТІВ ДО ТРАНСФОРМАЦІЙНИХ АТАК ШЛЯХОМ БАГАТОРІВНЕВОГО АНАЛІЗУ ОЗНАК

**Никоненко А.О., Фауре Е.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація** У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, що полягає в розробці гібридного методу ідентифікації автоматично згенерованих природномовних текстів, стійкого до трансформаційних атак маскування та епістемічної невизначеності. Об'єктом дослідження є процеси ідентифікації згенерованих текстів у складних інформаційних умовах. Предметом — гібридний метод детекції на основі багаторівневого аналізу. Проведене дослідження показало, що наявні системи маскування здійснюють глибокі структурні та семантичні трансформації, що суттєво знижує ефективність традиційних детекторів. Запропонований метод використовує каскадний ансамбль незалежних класифікаторів (лексичного, синтаксичного та семантичного модулів) із механізмом адаптивного зважування ознак. Такий підхід фіксує когнітивний дисонанс між лінгвістичними рівнями тексту, роблячи спроби маскування на одному рівні тригером для посилення детекції на іншому. Експериментально доведено, що гібридний метод здатен змістити Точку зламу системи екстремально праворуч (RR > 0.90), що фактично нівелює зону успішного маскування згенерованого контенту. В умовах протидії комерційним системам маскування (StealthGPT, AIHumanize, Phrasly) система забезпечує Recall на рівні 77.16%, що перевершує світові аналоги.

**Ключові слова:** гібридний метод, ідентифікація автоматично згенерованих текстів, трансформаційні атаки, робастність, Точка зламу.

# IMPROVING THE ROBUSTNESS OF AI-TEXT IDENTIFICATION SYSTEMS TO TRANSFORMATIONAL ATTACKS THROUGH MULTI-LEVEL FEATURE ANALYSIS

**Nykonenko A., Faure E.V.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract** This work addresses a pressing scientific and applied problem of developing a hybrid method for identifying automatically generated natural-language texts that is resistant to transformational masking attacks. The object of the study is the processes of identifying generated texts in complex informational environments. The subject is the hybrid detection method based on multi-level analysis. The study indicated that commercially available systems for masking perform deep transformations, significantly reducing the effectiveness of existing detectors. The proposed method utilizes a cascaded ensemble of independent classifiers (lexical, syntactic, and semantic modules) with an adaptive feature weighting mechanism. This approach captures cognitive dissonance between linguistic levels, making obfuscation attempts at one level a trigger for enhanced detection at another. Experimentally, it was proven that the hybrid method shifts the Breakdown point of the system extremely to the right (RR > 0.90), effectively eliminating the zone of successful masking. When countering commercial obfuscation systems, the system achieves a recall of 77.16%, outperforming global counterparts.

**Keywords:** hybrid method, identification of automatically generated texts, transformational attacks, robustness, Breakdown point.

**Вступ.** Широке впровадження великих мовних моделей (LLM), крім позитивних наслідків, призвело до появи викликів, пов'язаних із маніпулюванням суспільством та підривом принципів академічної доброчесності. Ситуація ускладнюється тим, що останні покоління LLM здатні генерувати тексти, які лексично та структурно неможливо відрізнити від текстів, написаних людиною [1]. Тому боротьба з новими викликами в інформаційній безпеці вимагає створення надійних інструментів ідентифікації штучно згенерованого контенту.

**Постановка задачі.** Проблема забезпечення комплексної робастності систем ідентифікації згенерованих текстів в умовах активного маскування залишається недостатньо

розв'язаною. Зокрема, детекція ШІ, заснована лише на одному рівні ознак (наприклад, тільки на лексичній перплексії), є вразливою до трансформаційних атак [2] і призводить до високого рівня хибнопозитивних спрацювань. Це обумовлює потребу в розробці гібридного методу ідентифікації, стійкого до сценаріїв маскування та епістемічної невизначеності.

**Мета роботи** – підвищення точності та робастності ідентифікації автоматично згенерованих природномовних текстів в умовах маскування та епістемічної невизначеності шляхом розробки гібридного методу, що інтегрує лексичні, синтаксичні та семантичні ознаки сліду ШІ.

**Вирішення проблеми.** В основі запропонованого підходу лежить архітектура каскадного ансамблю, де різні типи ознак розподілені за трьома незалежними модулями: лексичним ($M_{lex}$), синтаксичним ($M_{syn}$) та семантичним ($M_{sem}$). Така структура дозволяє реалізувати механізм взаємної валідації рішень, прийнятих на різних рівнях. Кожен із модулів генерує власну незалежну оцінку, яка передається до метакласифікатора для прийняття остаточного рішення.

Для математичного опису прийняття рішення використано адаптивне зважування:

$$w_j(X) = w_j^{stat} \cdot \alpha_j(X), \quad (1)$$

де $w_j^{stat}$ - вивчена статистична вага,

$\alpha_j(X)$ - динамічний коефіцієнт довіри, що змінюється залежно від виявленої атаки.

Наприклад, спроба обходу детектора на одному рівні (через перефразування) автоматично стає тригером для підвищення ймовірності детекції на інших рівнях.

Важливою складовою є концептуальна модель оцінки робастності шляхом введення формалізованого поняття Точки зламу (Breakdown Point, BP). Вона відображає математичний взаємозв'язок між інтенсивністю трансформацій тексту ($RR$), збереженням семантичної цілісності ($I_{sem}$) та ймовірністю виявлення ($P_{det}$). Візуалізація цієї моделі для гібридного методу наведена на рис. 1.

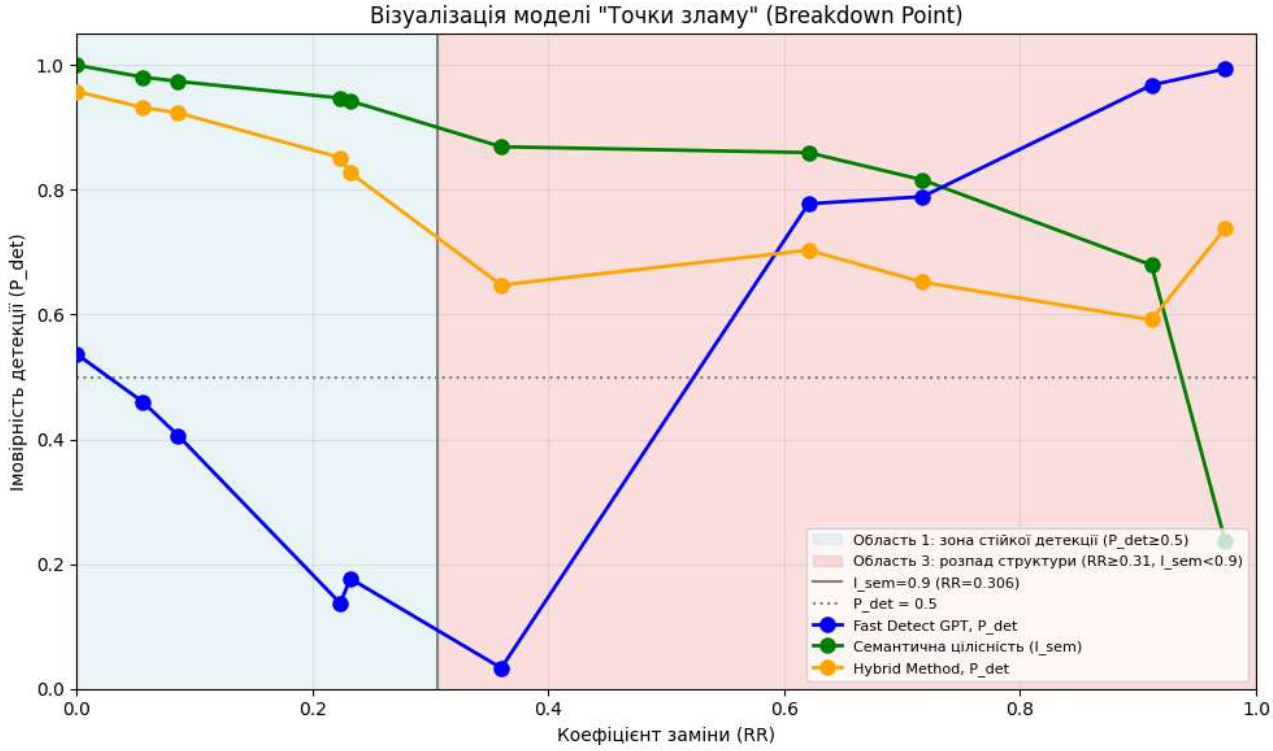



Рис. 1. Модель Точки зламу для гібридного методу детекції

В ході експериментів було проведено порівняння з сучасними аналогами (Fast-DetectGPT [3], DetectGPT [4] та MAGE [5]) в умовах атак комерційними парафразерами. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Порівняння ефективності детекції проти комерційних bypassers**

| Detector | Mean Recall | Mean ASR |
|---|---|---|
| Fast-DetectGPT | 60.15% | 39.85% |
| DetectGPT | 62.63% | 37.37% |
| MAGE | 64.51% | 35.49% |
| **Hybrid method** | **77.16%** | **22.84%** |

Отримані дані свідчать, що гібридний метод забезпечує найнижчий серед аналогів рівень успішності атак (ASR = 22.84%). Це досягається завдяки здатності системи повністю нівелювати зону успішного маскування згенерованого контенту.

**Висновки.** Розроблений гібридний метод ідентифікації автоматично згенерованих текстів, на відміну від класичних детекторів, дає змогу проводити аналіз міжрівневої узгодженості ознак. Практична апробація підтвердила, що застосування каскадного ансамблю дозволяє змістити Точку зламу детектора екстремально праворуч ($RR > 0.90$), що робить застосування атак перефразуванням функціонально безглуздим [2],[6]. Побудований програмний комплекс досягає показника точності F1 = 0.92 на стаціонарних даних та зберігає стабільність в умовах агресивного маскування.

## Список використаних джерел


1. Vaswani A. Attention is all you need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [et al.] // Advances in neural information processing systems. 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.
2. Sadasivan V. S. Can AI-generated text be reliably detected? / V. S. Sadasivan, A. Kumar, S. Balasubramanian [et al.] // arXiv preprint arXiv:2303.11156. 2023.
3. Bao G. Fast-DetectGPT: Efficient zero-shot detection of machine-generated text via conditional probability curvature / G. Bao, Y. Huang, Z. Zhang [et al.] // arXiv preprint arXiv:2310.05130. 2023.
4. Mitchell E. DetectGPT: Zero-shot machine-generated text detection using probability curvature / E. Mitchell, Z. Wu, T. Mitchell [et al.] // International Conference on Machine Learning. PMLR, 2023. P. 24950–24962.
5. Li Y. MAGE: Machine-generated text detection in the wild / Y. Li, Y. Huang, Z. Zhang [et al.] // Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2024. P. 124–138.
6. Krishna K. Paraphrasing evades detectors of ai-generated text, but retrieval is an effective defense / K. Krishna, Y. Song, S. Karpinska [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. 2023. Vol. 36. P. 27469–27500.

# МЕТОД ПОПЕРЕДНЬОЇ ПІДГОТОВКИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ БІОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

**Прокопенко Т., Поліщук О., Прокопенко В., Підкуйко О.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі запропоновано метод попередньої підготовки мультимодальних біометричних даних на основі двоступеневої системи нечіткого виводу типу Мамдані, який формує проміжний шар між сенсорним обладнанням (носимий сенсор EmotiBit, вебкамерний модуль розпізнавання емоцій обличчя) та великою мовною моделлю, що працює у режимі Retrieval-Augmented Generation (RAG). Перший рівень нечіткої системи оцінює функціональний стан користувача за фізіологічними та мімічними ознаками, другий — інтегральний показник продуктивності з урахуванням точності та часу реакції. Результат подається як структурований RAG-сумісний запис епізоду, який поєднує числові оцінки, лінгвістичні мітки та автоматично згенерований природномовний опис.

**Ключові слова**: нечітка логіка, FIS Мамдані, EmotiBit, розпізнавання емоцій, RAG, велика мовна модель, продуктивність працівника.

# METHOD OF PRE-PROCESSING OF MULTIMODAL BIOMETRIC DATA BASED ON FUZZY LOGIC

**Prokopenko T., Polishchyk O., Prokopenko V., Pidkuiko O.**
Cherkasy State Technology University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper proposes a method for pre-processing of multimodal biometric data based on a two-stage Mamdani-type fuzzy inference system that forms an intermediate layer between sensor hardware (wearable EmotiBit sensor, webcam-based facial expression recognition module) and a large language model operating in Retrieval-Augmented Generation (RAG) mode. The first stage estimates the user's functional state from physiological and facial features; the second one produces an integral productivity score that takes into account task accuracy and reaction time. The result is delivered as a structured RAG-compatible episode record combining numeric scores, linguistic labels and an automatically generated natural-language description.

**Keywords**: fuzzy logic, Mamdani FIS, EmotiBit, facial expression recognition, RAG, large language model, employee productivity.

**Вступ.** Довготривале стресове навантаження на працівників в Україні в умовах війни актуалізує задачу безперервного й об'єктивного оцінювання їхнього функціонального стану та продуктивності. Класичні HR-методики (анкети, KPI, експертні рейтинги) фіксують лише агреговані результати й слабко чутливі до короткочасних змін стану [1]. Біометричні системи (EDA, HR, HRV, FER) здатні об'єктивно реєструвати реакції організму [2, 3], але здебільшого видають числовий скор чи клас без семантично насиченого опису епізоду. Великі мовні моделі (LLM) у поєднанні з Retrieval-Augmented Generation (RAG) усе частіше використовуються для підтримки рішень у психофізіології [4], проте сирі сенсорні ряди EmotiBit чи відеокадри неможливо подавати в LLM напряму — як через довжину контексту, так і через відсутність у моделі компетенції щодо інтерпретації мікросекундних відліків.

**Мета роботи.** Розробити метод попередньої підготовки мультимодальних біометричних даних на базі нечіткої логіки, орієнтований на подальшу інтеграцію з RAG та великою мовною моделлю для оцінювання функціонального стану і продуктивності працівників інтелектуальної праці.

**Постановка проблеми.** У межах існуючих підходів спостерігається три розриви: HR-моделі нечіткого виводу спираються переважно на суб'єктивні анкетні шкали і майже не використовують об'єктивну біометрію [1]; біометричні класифікатори формують лише числовий або категоріальний вихід, без семантично насиченого опису епізоду [2, 3]; пряма передача в LLM сирих часових рядів є непрактичною. Виникає потреба у формалізованому

проміжному шарі, який переводив би мультимодальні дані у структуроване, інтерпретоване подання, придатне для індексування у векторному сховищі та використання у RAG-промптах [4].

**Основна частина.** Метод реалізується у вигляді чотиришарової архітектури: (1) шар збору даних — носимий сенсор EmotiBit (понад 16 потоків: EDA, PPG, HR, IBI, температура, IMU) [5] та FullHD-вебкамера з модулем розпізнавання емоцій обличчя на базі open-source бібліотеки LibreFace [6]; (2) шар синхронізації та формування ознак на часових вікнах довжиною 30–60 с; (3) шар нечіткого виводу — двоступенева система Мамдані [7]; (4) шар RAG-сумісного подання результату.

Усі числові показники нормуються відносно індивідуального базового рівня користувача, що враховує міжіндивідуальні відмінності у фізіологічних сигналах [3]: $\Delta EDA_k = (EDA_k - EDA_{base}) / EDA_{base}$; аналогічно обчислюється $\Delta HR_k$. Перший рівень FIS приймає 8 лінгвістичних змінних (ΔEDA, частота SCR, ΔHR, RMSSD, ΔTemp, рухова активність, негативний та позитивний афект обличчя) і визначає функціональний стан $S_k \in \{RELAXED, OPTIMAL, OVERLOADED\}$. Другий рівень поєднує $S_k$ з поведінковими метриками (точність $Acc_k$, час реакції $RT_k$, складність $D_k$) і дає оцінку продуктивності $P_k \in \{LOW, MEDIUM, HIGH\}$. Сила активації правила обчислюється як $\alpha_r = \min(\mu_{A1}(x_1), \ldots, \mu_{An}(x_n))$, а дефазифікація виконується методом центру ваги. База правил із 20 продукцій поєднує знання з HR-моделей нечіткого виводу [1] та сучасні підходи до оцінювання стресу за фізіологічними сигналами [2, 3].

Результат кожного вікна упаковується у структурований запис (агреговані ознаки + лінгвістичні мітки + природномовний опис), який індексується у векторному сховищі та подається у промпт LLM як «схожий випадок» згідно з парадигмою RAG [4]. Поведінку методу перевірено на двох сценаріях: «оптимальний стан» (ΔEDA = 0,10; ΔHR = 0,05; NegFace = 0,10; Acc = 0,90) — $\hat{S} \approx 5{,}4$ (OPTIMAL); $\hat{P} \approx 0{,}85$ (HIGH); «перевантаження» (ΔEDA = 0,48; ΔHR = 0,32; NegFace = 0,72; Acc = 0,56; RT = 5,2 с) — $\hat{S} \approx 8{,}1$ (OVERLOADED); $\hat{P} \approx 0{,}31$ (LOW). Модель коректно розв’язує суперечливі ситуації (наприклад, формальної «оптимальності» при низькій точності) завдяки врахуванню $Acc_k$ і $RT_k$ на другому рівні бази правил.

**Висновки.** Запропонований метод поєднує три раніше слабкоінтегровані напрями — нечітку HR-оцінку, мультимодальну біометрію та RAG-LLM. Наукова новизна полягає у тому, що інтерпретованість FIS поєднується з об’єктивністю біометричних сигналів і семантичною структурованістю виходу для LLM. Практична значущість — модуль попередньої обробки даних для рішень з оцінювання функціонального стану працівників, у тому числі в умовах хронічного стресового навантаження. Подальші роботи передбачають калібрування функцій належності та бази правил на пілотній вибірці й кількісне порівняння режимів LLM «без шару» та «з FIS/RAG-шаром».

**Список використаних джерел**


1. Kumar P. A. The Influence of Emotional Intelligence on Employee Engagement and Productivity. *ACR Journal*. 2025. URL: https://acr-journal.com/article/the-influence-of-emotional-intelligence-on-employee-engagement-and-productivity-880/.
2. Coverage of Emotion Recognition for Common Wearable Biosensors. *PMC*. 2018. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6023004/.
3. Personalized vs Generalized Approaches for Emotion Classification. *JMIR AI*. 2024. URL: https://ai.jmir.org/2024/1/e52171/.
4. Lewis P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *arXiv:2005.11401*. 2020. URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401.
5. EmotiBit Data Types and Stream Documentation. URL: https://github.com/EmotiBit/EmotiBit_Docs/blob/master/Working_with_emotibit_data.md.
6. LibreFace: An Open-Source Toolkit for Deep Facial Expression Analysis. URL: https://github.com/ihp-lab/LibreFace.
7. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, No. 1. P. 1–13.

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЦІННІСНОЇ ПРОПОЗИЦІЇ ІТ-ПРОДУКТУ

**Riashchenko V.[1], Шайволодян Р.[2], Михелєв І.[2], Лобач О.[3]**
[1]Riga Nordic University, Riga, Latvia,
[2]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна,
[3]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

**Анотація.** В роботі розглянуто підхід до формування ціннісної пропозиції ІТ-продукту на основі інтелектуальних методів аналізу даних та штучного інтелекту. Запропоновано розгляд ціннісної пропозиції як динамічної системи, що проходить послідовні етапи виявлення потреб, фільтрації за бізнес-цінністю, оцінки технічної здійсненності та оптимізації з урахуванням поведінки користувачів. Використання моделей регресії, нейронних мереж, кластеризації та оптимізаційних алгоритмів дозволяє формалізувати процес прийняття рішень і забезпечити відповідність продукту вимогам ринку. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу для підвищення конкурентоспроможності ІТ-продуктів.

**Ключові слова:** ціннісна пропозиція, ІТ-продукт, Product-MarketFit, інтелектуальний аналіз даних, машинне навчання, оптимізація, кластеризація, прогнозування

# INTELLECTUAL TECHNOLOGY OF FORMING THE VALUE PROPOSITION OF IT PRODUCTS

**Riashchenko V.[1], Shayvolodyan R.[2], Mykheliev I.[2], Lobach O.[3]**
[1]Riga Nordic University, Riga, Latvia,
[2]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,
[3]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The paper considers an approach to forming the value proposition of an IT product based on intelligent methods of data analysis and artificial intelligence. It is proposed to consider the value proposition as a dynamic system that goes through successive stages of identifying needs, filtering by business value, assessing technical feasibility and optimizing taking into account user behavior. The use of regression models, neural networks, clustering and optimization algorithms allows formalizing the decision-making process and ensuring that the product meets market requirements. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed approach for increasing the competitiveness of IT products.

**Keywords:** value proposition, IT product, Product-Market Fit, data mining, machine learning, optimization, clustering, forecasting

**Вступ.** Проблема управління маркетингом в ІТ-проєктах через формування ціннісної пропозиції ІТ-продукту має достатнє висвітлення в професійній та науковій літературі. Так в статті [1] автори висвітлюють проблему складності оцінки ефективності digital-маркетингу, яка полягає у відсутності узгодженої системи показників і розрізненості даних з різних каналів; у якості рішення запропоновано аналітичний підхід із системою KPI та інтегрованими метриками, що дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень. У статті [2] піднімається проблема відсутності цілісного управління клієнтським досвідом, що проявляється у розриві між етапами взаємодії користувача з продуктом; рішенням є модель customer journey, яка забезпечує узгоджене управління всіма точками контакту

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка інтелектуальної технології формування ціннісної пропозиції ІТ-продукту в межах маркетингового проєкту.

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах високої конкуренції на ІТ-ринку процес формування продукту часто здійснюється без належного урахування реальних очікувань користувачів, що призводить до невідповідності між функціональністю продукту та його сприйнятою цінністю. Це обумовлює необхідність інтеграції концепції ціннісної пропозиції

у процес розробки, що дозволяє забезпечити узгодженість технічних рішень із потребами ринку та підвищити ймовірність досягнення Product-MarketFit.

**Основна частина.** Інтелектуальна технологія формування ціннісної пропозиції IT-продукту відображає перехід від інтуїтивного підходу до алгоритмічного управління [3]. Проблема полягає в тому, що до 70% IT-продуктів не досягають Product-MarketFit через невідповідність очікуванням користувачів, запізнілий вихід на ринок і помилки у ціноутворенні. Тому ціннісна пропозиція розглядається як динамічна система $VP(t)$, яка змінюється в часі та потребує інтелектуальної фільтрації на кожному етапі життєвого циклу.

На етапі Discovery використовується модель обробки тексту для виявлення потреб. NLP із sentiment analysis формалізується як задача класифікації:

$$y = softmax(Wx + b),$$

де $x$ – вектор ознак тексту (TF-IDF або embedding), $W$– матриця ваг, $b$ – вектор зсуву, $y$ – ймовірність належності до класів (позитив, негатив, нейтрально).

Вхід – тексти відгуків і соціальних мереж, вихід – структуровані "больові точки". Додатково модель JTBD описує потребу як трійку:

$$J = (S, A, O),$$

де $S$ – ситуація, $A$ – дія, $O$ – очікуваний результат. Результатом є множина гіпотез цінності $V = \{v_i\}$.

Перший фільтр – оцінка бізнес-цінності через регресійну модель:

$$LTV = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \epsilon,$$

де $x_i$ – наявність або інтенсивність функцій, $\beta_i$ – коефіцієнти впливу, $\epsilon$ – похибка. Вхід – характеристики функцій, вихід – прогноз LTV.

Predictive analytics розширює модель до функції прибутку:

$$P = f(V, C, M),$$

де $V$ – цінність, $C$ – витрати, $M$ – ринок. Результат – відбір економічно доцільних елементів.

Другий фільтр – оцінка технічної реалістичності. Нейронна мережа прогнозує час розробки:

$$T = f(X; \theta),$$

де $X$ – параметри складності (архітектура, команда), $\theta$ – параметри моделі, $T$ – час.

Monte Carlo моделює ризики:

$$P(T \le T_{deadline}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} I(T_i \le T_{deadline}),$$

де $I$ – індикаторна функція. Вхід – розподіли часу, вихід – ймовірність встигнути у ринок.

Третій фільтр – оптимізація конверсії. Генетичний алгоритм максимізує функцію:

$$\max F = \alpha \cdot CR + \beta \cdot Profit,$$

де $CR$ – конверсія, $Profit$ – прибуток, $\alpha, \beta$ – ваги.

Вхід – комбінації функцій і ціни, вихід – оптимальний варіант. K-means сегментує користувачів:

$$argmin \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} || x - \mu_i ||^2,$$

де $C_i$ – кластер, $\mu_i$ – центр. Це дозволяє створювати персоналізовані VP.

На етапі валідації використовується A/B тестування:

$$\Delta = CR_A - CR_B,$$

де $CR$ – конверсія варіантів.

Вхід – поведінка користувачів, вихід – оптимальна версія VP. У результаті формується замкнений цикл, де цінність постійно оновлюється. Такий підхід поєднує класичні моделі з машинним навчанням і дозволяє зменшити витрати на непотрібний функціонал та забезпечити відповідність продукту реальним потребам ринку.

**Висновки.** Таким чином, в результаті розроблено інтелектуальну технологію формування ціннісної пропозиції IT-продукту, яка дозволяє здійснити перехід від інтуїтивних методів проектування до алгоритмічного та обґрунтованого управління маркетинговим процесом. Актуальність цієї технології зумовлена високим рівнем конкуренції на ринку за якою більшість інноваційних продуктів зазнають невдачі через невідповідність реальним очікуванням кінцевих користувачів і несвоєчасний вихід на ринок. Запропонований підхід розглядає ціннісну пропозицію як динамічну систему, що зазнає трансформацій протягом усього життєвого циклу проекту та потребує постійного математичного й аналітичного коригування.

Головним її елементом є система інтелектуальних фільтрів, які мінімізують бізнес-ризики та оптимізують ресурси розробки. Сенс використання цих фільтрів полягає у багатокритеріальному відсіюванні неефективних, занадто дорогих або технічно нереалістичних ідей ще на ранніх етапах, що запобігає витратам на розробку непотрібного функціоналу.

Перший фільтр за допомогою регресійного аналізу оцінює потенційну бізнес-цінність та прогнозує життєвий цикл клієнта, відбираючи виключно економічно доцільні елементи. Другий фільтр спрямований на верифікацію технічної реалістичності проекту, де нейромережеві моделі та метод Монте-Карло дозволяють розрахувати точні часові межі й оцінити ймовірність успішного виходу продукту на ринок до встановленого дедлайну. Третій фільтр фокусується на оптимізації конверсії та прибутку за допомогою генетичних алгоритмів і кластеризації користувачів методом K-means, що забезпечує глибоку персоналізацію пропозиції для різних ринкових сегментів. Навіщо потрібні такі фільтри, безпосередньо пояснюється прагненням розробників досягти максимальної відповідності між технічними рішеннями та ринковим попитом.

Кінцевим результатом проходження через зазначені фільтри є формування математично вивіреного, збалансованого та адаптивного варіанта ціннісної пропозиції, який має найвищий потенціал для досягнення стабільного Product-Market Fit. Цей результат матеріалізується у вигляді структурованого набору функцій і цінових комбінацій, які пройшли етап валідації через інструменти A/B тестування та готові до успішного масштабування.

Таким чином, синергія класичних маркетингових моделей із сучасними методами машинного навчання забезпечує створення замкненого циклу оновлення цінності, що суттєво підвищує загальну комерційну ефективність та конкурентоспроможність IT-продукту в сучасних високотехнологічних умовах.

## Список використаних джерел


1. Шеховцова, В. І., & Клименко, Д. А. (2024). Аналітичні підходи та інструменти розробки ціннісної пропозиції в сучасному бізнесі. In *VIII International scientific and practical conference "Scientific Research as a Mechanism of Effective Human Development"(January 31–February 2, 2024) Sofia, Bulgaria, International Scientific Unity* (pp. 89-91).
2. Hardcastle, K., Vorster, L., & Brown, D. M. (2025). Understanding customer responses to AI-driven personalized journeys: Impacts on the customer experience. *Journal of Advertising, 54*(2), 176-195.
3. Шайволодян Р.Ш., Михелєв І.Л. (2025). Унікальна цінність IT-продукту як елемент управління маркетингом. Управління проектами у розвитку суспільства. Тема: «Управління проєктами післявоєнної розбудови України»: тези доповідей: КНУБА, 338-342.

# ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ РИЗИКУ БАНКРУТСТВА ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ ТРАНСФОРМЕРНОЇ АРХІТЕКТУРИ

**Сіньковський А.П., Триус Ю.В., Шулаков В.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі запропоновано трансформерну нейромережеву модель FTNNB (Fuzzified Transformer Neural Network for Bankruptcy) для оцінювання ризику банкрутства підприємства, яка поєднує нейро-нечіткий механізм фазифікації фінансових показників з архітектурою трансформера. Метою дослідження є підвищення якості прогнозування банкрутства за рахунок інтеграції механізму multi-head attention з блоками фазифікації, що забезпечує опрацювання нечітких представлень показників та стійкість до часткової відсутності вхідних даних. Об'ктом дослідження є процес оцінювання фінансового стану підприємств, предметом — методи побудови нейромережевих моделей прогнозування банкрутства. Експериментальну перевірку виконано на наборі даних US Company Bankruptcy Prediction Dataset з груповим розбиттям за компаніями та оцінюванням за метрикою F1-score. Як еталонні моделі обрано класичну Z-score модель Альтмана та сучаснішу гібридну архітектуру LSTM-ANFIS, що поєднує рекурентний LSTM-енкодер з нечітким висновком ANFIS. Результати порівняння засвідчують, що FTNNB досягає F1-score 85 %, що на 49% перевищує показники моделі Альтмана (36%) і на 44% — гібрид LSTM-ANFIS (41%) на тій самій вибірці.

**Ключові слова:** ризик банкрутства, фінанси, нейронні мережі, трансформер, фазифікація, прогнозування.

# ESTIMATING ENTERPRISE BANKRUPTCY RISK LEVEL WITH A NEURO-FUZZY TRANSFORMER ARCHITECTURE

**Sinkovskyi A., Tryus Yu., Shulakov V.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper proposes a transformer-based neural network model FTNNB (Fuzzified Transformer Neural Network for Bankruptcy) for estimating enterprise bankruptcy risk. The model combines a neuro-fuzzy fuzzification mechanism for financial indicators with the transformer architecture. The aim of the research is to improve bankruptcy prediction quality by integrating a multi-head attention mechanism with fuzzifier blocks, which enables processing of fuzzy representations of indicators and ensures robustness to partial missingness of input data. The research object is the process of enterprise financial state assessment; the subject covers methods of building neural network models for bankruptcy forecasting. Experimental evaluation is performed on the US Company Bankruptcy Prediction Dataset with a company-level group split and the F1-score metric. The proposed FTNNB is compared with the classical Altman Z-score model and a more recent hybrid LSTM-ANFIS architecture that couples a recurrent LSTM encoder with an ANFIS fuzzy inference head. FTNNB attains an F1-score of 85%, exceeding Altman (36%) and LSTM-ANFIS (41%) by 49% and 44%, respectively, on the same data.

**Keywords:** bankruptcy risk, finance, neural networks, transformer, fuzzification, forecasting.

**Вступ.** Своєчасне виявлення ознак фінансової нестабільності підприємства є важливою умовою забезпечення його ефективного функціонування. Класичні статистичні підходи, зокрема Z-score модель Альтмана, мають обмеження щодо роботи з нелінійними залежностями та неповними даними, що обумовлює актуальність застосування методів машинного навчання. Серед нейро-нечітких підходів класичним рішенням є модель ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), яка інтегрує апарат нечіткої логіки з градієнтним навчанням і забезпечує інтерпретованість прийнятих рішень. До сучасних розвинень нейро-нечіткого напрямку належать також нечіткі згорткові нейромережі для прогнозування банкрутства [3], що поєднують згорткові фільтри з нечіткими функціями належності. Подальший розвиток цього напрямку — гібридні моделі, що поєднують ANFIS з рекурентними нейромережами LSTM для врахування часової динаміки фінансових показників. Проте такі гібриди зберігають характерну для рекурентних архітектур послідовну природу опрацювання ознак, що обмежує моделювання глобальних взаємозв'язків між показниками та мотивує перехід до архітектур на основі механізму multi-head attention [5].

**Мета роботи.** Розробка нейромережевої моделі з нейро-нечітким механізмом фазифікації фінансових показників на основі архітектури трансформера для оцінювання

ризику банкрутства підприємства та її експериментальне порівняння з еталонними підходами на спільному розбитті даних.

**Постановка задачі.** Експериментальне дослідження виконано на наборі даних US Company Bankruptcy Prediction Dataset [1], що містить інформацію про американські публічні компанії за період 1999–2018 рр. Кожен запис описано 18 фінансовими показниками X1–X18 (структура балансу, оборотні кошти, доходи, витрати, грошові потоки) та міткою фінансового стану «alive»/«failed». Більшість існуючих нейромережевих моделей прогнозування банкрутства орієнтовані на повний набір вхідних показників і чутливі до якості нормалізації даних, що обмежує їх застосування на реальних вибірках, де частина показників може бути відсутньою. Звідси постає потреба в архітектурі, що поєднує здатність до опрацювання послідовностей фінансових ознак зі стійкістю до неповних даних та зберігає інтерпретованість вхідних представлень. Розбиття вибірки виконано за компаніями (групове розбиття без перетину компаній між навчальною, валідаційною та тестовою підмножинами), що виключає протікання інформації між підмножинами.

**Основна частина.** Запропонована модель FTNNB складається з блоку фазифікації фінансових показників, шару додавання позиційної інформації, чотирьох послідовних шарів трансформера з механізмом multi-head attention, лінійного проєкційного шару та функції активації softmax (рис. 1). Кожен фінансовий показник $x_i$ перетворюється у вектор значень функцій належності $\mu_i = (\mu_i^1, \ldots, \mu_i^k)$ фіксованої кількості нечітких термів $K$, що дозволяє моделі опрацьовувати нечіткі та частково відсутні вхідні дані. Вихід моделі формується у вигляді розподілу ймовірностей класів:

$$P = (p_{alive}, p_{failed}), p_{alive} + p_{failed} = 1,$$

де $p_{failed}$ – ймовірність належності підприємства до класу «банкрут», $p_{alive}$ – ймовірність фінансової стійкості.

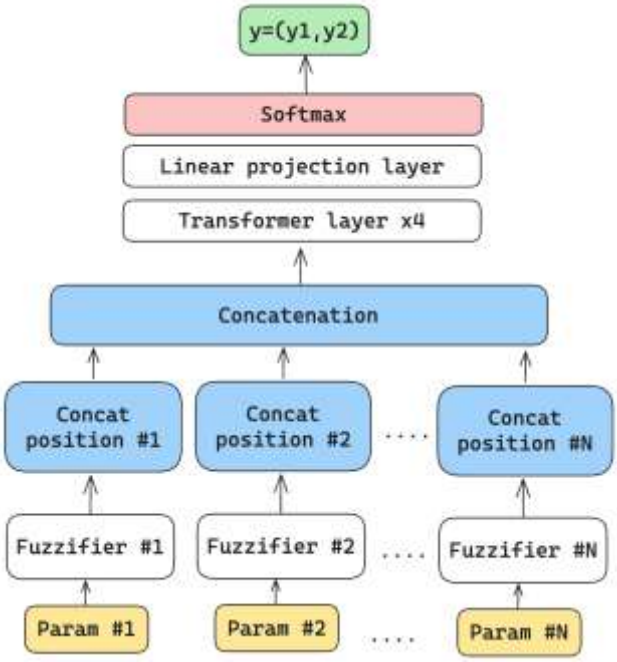



Рис. 1. Архітектура нейронної мережі FTNNB

У блоці прямого поширення (feed-forward) кожного шару трансформера реалізовано модифікацію функції активації з переходом від ReLU до Squared ReLU [2], що покращує збіжність на фінансових даних. Для тренування використано оптимізатор Adam з планувальником лінійного спаду навчальної швидкості та фазою розігріву (linear schedule with warmup). Ключові гіперпараметри моделі: 18 вхідних фінансових показників, $K = 32$ нечітких терми на кожен показник, латентний простір розмірності 50 (18 вимірів для позиційної інформації, 32 виміри для фазифікованого представлення ознак), 5 attention-голів, 4 шари трансформера, прихований шар розмірністю 64, розмір пакета 128, 250 епох навчання.

**Наукова новизна** роботи полягає в інтеграції нейро-нечіткого фазифікатора фінансових показників з трансформерним механізмом multi-head attention та модифікованою квадратичною функцією активації Squared ReLU, що, на відміну від рекурентних нейро-нечітких гібридів, дозволяє паралельно моделювати глобальні взаємозв'язки між показниками та забезпечує стійкість моделі до неповноти вхідних даних.

**Результати експерименту.** Для оцінювання використано метрику F1-score на тестовій підмножині, сформованій із груповим розбиттям за компаніями. Порівнюються три моделі: класична п'ятифакторна Z-score модель Альтмана; гібридна нейро-нечітка архітектура LSTM-ANFIS, що поєднує двонапрямлений LSTM-енкодер з нечітким висновком ANFIS на основі правил Sugeno–Takagi; та запропонована FTNNB (табл. 1).

Таблиця 1

**Порівняння моделей за F1-score на наборі US Company Bankruptcy Prediction Dataset (тестова підмножина, групове розбиття за компаніями)**

| Модель | Тип архітектури | F1-score, % |
|---|---|---|
| Модель Альтмана (Z-score) | Лінійний дискримінант | 36 |
| Гібрид LSTM-ANFIS | Нейро-нечітка з LSTM-енкодером | 41 |
| FTNNB (запропоновано) | Трансформер з нейро-нечітким фазифікатором | 85 |

Аналіз результатів свідчить про послідовне покращення прогностичної якості з ускладненням архітектури. Класична Z-score модель Альтмана (36%) як лінійний дискримінант фіксованої форми не відображає нелінійних взаємозв'язків між фінансовими показниками. Гібрид LSTM-ANFIS (41%) частково долає це обмеження за рахунок поєднання рекурентного LSTM-енкодера для опрацювання часової динаміки з нечітким висновком, що зберігає інтерпретованість. Однак суттєвий приріст забезпечує саме перехід до запропонованої FTNNB (85%): механізм multi-head attention паралельно моделює глобальні взаємозв'язки між фазифікованими фінансовими показниками, тоді як LSTM змушений опрацьовувати ознаки послідовно з обмеженим обсягом прихованого стану. Додаткове розширення простору нечіткої фазифікації у поєднанні з функцією активації Squared ReLU забезпечує більш точну апроксимацію меж рішень, особливо для позитивного класу, частка якого становить близько 2 % у тестовій вибірці. Це відповідає відомій проблемі дисбалансу класів у задачах прогнозування банкрутства [4].

**Висновки.** У роботі запропоновано та експериментально досліджено трансформерну нейромережеву модель FTNNB з нейро-нечітким механізмом фазифікації фінансових показників для оцінювання ризику банкрутства підприємств. На наборі даних US Company Bankruptcy Prediction Dataset з груповим розбиттям за компаніями FTNNB досягла F1-score 85%, що на 49% перевищує класичну Z-score модель Альтмана (36%) і на 44% — гібридну архітектуру LSTM-ANFIS (41%) на тій самій вибірці. Експериментально підтверджено, що поєднання multi-head attention з фазифікованим вхідним представленням забезпечує суттєвий приріст якості порівняно з рекурентними нейро-нечіткими гібридами, які моделюють часову динаміку, але не охоплюють глобальних взаємозв'язків між показниками. Запропонований підхід може бути використано в системах підтримки прийняття рішень для оцінювання фінансового стану підприємств, зокрема за умов неповних або зашумлених вхідних даних.

## Список використаних джерел


1. Ben Jabeur, S., Serret, V. (2023). Bankruptcy prediction using fuzzy convolutional neural networks. Research in International Business and Finance, 64, 101844. https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2022.101844.
2. Yang, Y., Chen, Y., Wang, H. (2022). Financial distress prediction based on hybrid deep learning and attention mechanism. Expert Systems with Applications, 195, 116593. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116593.
3. So, D. R., Mańke, W., Liu, H., Dai, Z., Shazeer, N., Le, Q. V. (2021). Primer: Searching for Efficient Transformers for Language Modeling. arXiv preprint arXiv:2109.08668.
4. Singh, U. US Company Bankruptcy Prediction Dataset. URL: https://www.kaggle.com/datasets/utkarshx27/american-companies-bankruptcy-prediction-dataset (дата звернення: 11.05.2026).
5. Liashenko, O., Kravets, T., Kostovetskyi, Y. (2023). Machine Learning and Data Balancing Methods for Bankruptcy Prediction. Ekonomika, 102(2), 28–46. https://doi.org/10.15388/Ekon.2023.102.2.2.

# НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕФЛЕКТОРНИХ ПРОГНОЗУЮЧИХ СИСТЕМ

**Тесля Ю.М.[1], Хлевна Ю.Л.[2], Катаєва Є.Ю.[3], Клєванна Г.О.[4], Латишева Т.В.[2], Частоколенко І.П.[5]**

[1]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[3]Університет Коменського в Братиславі, Братислава, Словаччина
[4] Релігійна організація «Вищий богословський навчальний заклад «Таврійський християнський інститут», Київ, Україна
[5]Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

**Анотація.** В матеріалах роботи наводяться підхід, моделі та метод рефлекторних прогнозуючих систем та приклад використання такої системи для прогнозування результатів футбольних матчів.

Об'єктом даного дослідження є прогнозуючі інтелектуальні системи. Предмет дослідження – підхід, моделі та метод рефлекторних прогнозуючих систем. Метою роботи є створення ефективних, простих, предметно незалежних інструментів прогнозування на базі рефлекторного підходу до побудови інтелектуальних систем. Проведено аналіз науково-методологічних підходів до створення реактивних інтелектуальних систем, які можуть застосовуватися для вирішення задач прогнозування. Показано, що ці підходи не забезпечують достатньої ефективності та універсальності прогнозуючих інтелектуальних систем. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використати рефлекторний підхід, який лежить в основі створення систем що моделюють процеси інформаційної взаємодії в фізичних і біологічних середовищах. Запропоновано метод рефлекторного прогнозування. Наведені сфери застосування та задачі, вирішення яких вимагає ефективності, простоти та універсальності інструментів прогнозування, що відповідає характеристикам рефлекторних інтелектуальних систем. Наведено приклади практичної розробки цих систем в різних сферах для вирішення задач прогнозування.

**Ключові слова:** інтелектуальні системи, несилова (інформаційна) взаємодія, прогнозування, рефлекторний підхід, рефлекторний метод.

# THE SCIENTIFIC BASIS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF REFLECTIVE FORECASTING SYSTEMS

**Teslia Iu.[1], Khlevna Iu.[2], Kataieva Ye.[3], Klievanna G.[4], Latysheva T.[2], Chastokolenko I.[5]**

[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[3]Comenius University Bratislava, Bratislava, Slovakia
[4]Religious organization "Higher theological educational establishment "Tavriski christian institute", Kyiv, Ukraine
[5]National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper presents an approach, models, and a method for reflexive forecasting systems, as well as an example of using such a system to predict the outcomes of soccer matches.

The object of this study is intelligent forecasting systems. The subject of the study is an approach, models, and a method of reflexive forecasting systems. The aim of this work is to create effective, simple, domain-independent forecasting tools based on a reflexive approach to building intelligent systems. An analysis of scientific and methodological approaches to creating reactive intelligent systems that can be applied to solving forecasting problems has been conducted. It is shown that these approaches do not ensure sufficient efficiency and versatility of predictive intelligent systems. To address this issue, it is proposed to use a reflexive approach, which forms the basis for creating systems that model information interaction processes in physical and biological environments. A method of reflexive forecasting is proposed. The areas of application and tasks are presented, the solution of which requires efficiency, simplicity, and versatility

of forecasting tools, which corresponds to the characteristics of reflexive intelligent systems. Examples of the practical development of these systems in various fields for solving forecasting problems are provided.
**Keywords:** intelligent systems, non-force (informational) interaction, forecasting, reflexive approach, reflexive method.

**Вступ.** Важливим питанням діяльності людини є прогнозування – в бізнесі, політиці, економіці, спортивних заходах, природніх явищах і т.д. Для вирішення цих та інших задач прогнозування розроблено багато методів та створено чимало різноманітних аналітичних систем [1 – 5]. Але поки що їх результати не задовольняють вимоги працівників багатьох сфер. Тому є необхідність в подальших наукових дослідженнях, які спрямовані на побудову ефективних прогнозуючих систем.

**Мета роботи.** Створення ефективних, простих, предметно незалежних інструментів прогнозування на базі рефлекторного підходу до побудови інтелектуальних систем.

**Постановка задачі.** Сучасні підходи до прогнозування в складних динамічних предметних областях, зокрема в аналітиці футбольних матчів, переважно базуються на методах машинного навчання та ансамблевих моделях, які демонструють вищу точність порівняно з класичними статистичними підходами [1-5]. Але поки що немає універсальних систем прогнозування, які б краще за людину прогнозували в різних предметних областях. Останні дослідження також підкреслюють зростаючу роль мультиагентних підходів і методів навчання з підкріпленням, які дозволяють моделювати взаємодію елементів у складних середовищах [3]. Такі системи не забезпечують надійного прогнозування в реальних умовах функціонування складних систем. По суті ці системи: прогнозують, але повільні; вимагають розділення навчання і прогнозування і нестабільні.

**Вирішення проблеми.** Це все обумовлює необхідність пошуку альтернативних підходів. Досить ефективним для вирішення різноманітних інтелектуальних задач показав себе рефлекторний підхід [6-8]. Такі системи: не прогнозують, а реагують; не будують модель, а вибирають реакцію; працюють миттєво; навчальною вибірко є вся попередня історія з нульовими витратами на оновлення бази рефлексів.

Для створення інтелектуальних систем на концепції рефлекторного прогнозування пропонується представити зв'язок між чинниками, що впливають на прогноз та реакцією інтелектуальної системи через процеси вироблення та реалізації рефлексів на інформаційні впливи в заданій предметній області. Такий підхід дозволяє використати природні процеси, характерні для рефлекторної поведінки, з метою створення систем прогнозування.

Метод наповнення, налаштування і використання рефлекторної прогнозуючої системи включає наступні етапи: визначення предметної області, її параметрів що прогнозуються; визначення чинників впливу по всьому часовому ряду; визначення чинників впливу з обмеженим часом використання; формування статистичної вибірки і внесення її в базу даних; розрахунок впливу чинників на параметри предметної області; моделювання використання комбінацій чинників впливу для прогнозування параметрів предметної області; відбір найбільш значимих чинників впливу; прогнозування з використанням методу несилової (інформаційної) взаємодії.

В прогнозуванні «майбутнього» використовується статистична інформація «теперішнього» і «минулого». Це значно прискорює і спрощує роботу такої системи, порівняно з системами, що використовують штучні нейромережі.

**Практична реалізація.** З застосуванням наведеного підходу та методу була створена універсальна система прогнозування. В її основі створені в рамках попередніх досліджень вузькопрофільні системи прогнозування результатів футбольних матчів, обробки природної мови та планування проєктів [6-8]. Для системи прогнозування результатів футбольних матчів чинниками були попередні матчі, а результатом – прогноз на наступні матчі. Для планування проєктів чинниками були результати виконання попередніх проєктів, а результатом прогноз тривалості та обсяги ресурсів, що будуть використані. Обидві системи

в межах практичної перевірки показали результати, які були кращими, порівняно з іншими способами прогнозування [6-8].

**Висновки.** Розробка методів та алгоритмів прогнозування, які є універсальними і можуть з успіхом застосовуватись в багатьох предметних областях – є актуальною науковою задачею. Тому створення методу, який ліг в основу рефлекторних прогнозуючих систем є рішенням цієї задачі. Показано, що рефлекторна прогнозуюча система застосовна і ефективна для різних предметних областей [6-8]. Що ставить питання перед дослідниками про подальше використання рефлекторних прогнозуючих систем і для інших сфер.

## Список використаних джерел


1. Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.).* Pearson.
2. Lee, J., & Lee, L. (2026). Three-dimensional convolutional neural network-based forecasting of wildfire spread from satellite fire detections and environmental context layers. *International Journal of Environment and Climate Change*, 16(5), 498–509. https://doi.org/10.9734/ijecc/2026/v16i55452
3. Alva, L. R., & Pandey, B. (2026). Agentic AI systems in the age of generative models: architectures, cloud scalability, and real-world applications. Artificial Intelligence Review, 59, 88. https://doi.org/10.1007/s10462-025-11458-6
4. Wen, Y., Ye, Y., Zhang, Y., Yang, D., & Zhu, H. (2025). Real-Time Reasoning Agents in Evolving Environments. https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.04898
5. Elguea-Aguinaco, Í., et al. (2024). A Review on Reinforcement Learning for Motion Planning of Robotic Manipulators. International Journal of Intelligent Systems. https://doi.org/10.1155/int/1636497
6. Teslia, I., et al. (2021). Using the Reflex Method to Predict the Results of Football Matches. Proceedings of the International Conference “Information Technologies and Computer Modelling”, pp. 106–107. https://itcm.comp-sc.if.ua/2021/zbirnyk_2021.pdf
7. Teslia, I. (2022). Experimental verification of the theory of non-force (information) interaction. *Journal of Modern Physics*, 13(4), 518–573. https://doi.org/10.4236/jmp.2022.134034
8. Teslia, I., Yegorchenkov, O., Khlevna, I., Yegorchenkova, N., Kataeva, Y., Khlevny, A., & Klevanna, G. (2023). Development of the concept of intelligent add-on over project planning instruments. In *Information Technology for Education, Science and Technics (ITEST 2022)* (pp. 149–161). Springer. https://www.springerprofessional.de/en/development-of-the-concept-of-intelligent-add-on-over-project-pl/25507704

# ЕНЕРГІЇ ФОРМУВАННЯ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ У ПІРЕНІ ЯК МІНІМАЛЬНІЙ МОДЕЛІ ГРАФЕНОВОЇ КВАНТОВОЇ ТОЧКИ

**Тужиков А.[1], Соловйов В.[1], Ків А.[1,2]**
[1]Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К.Д. Ушинського, Одеса, Україна
[2]Неґевський університет Бен-Гуріона, м. Беер-Шева, Ізраїль

**Анотація**. Розраховано та проаналізовано енергії формування трьох класів точкових дефектів – моновакансії, дивакансії та дефекту Стоуна–Уельса – у пірені $C_{16}H_{10}$ як найменшій моделі графенової квантової точки (ГКТ). ГКТ мають перспективи застосування в електродних матеріалах акумуляторів і суперконденсаторів, у каталізі та як флуоресцентні маркери для біовізуалізації, причому функціональні характеристики ГКТ безпосередньо визначаються типом і локалізацією дефектів. Розрахунки виконано двома методами: теорією функціонала густини (DFT, density functional theory) та універсальним машинно-навченим міжатомним потенціалом (MLIP, machine-learning interatomic potential). Для центрального дефекту Стоуна–Уельса обидва методи відтворюють канонічну реконструкцію 5–7–7–5 з енергією формування ≈2 еВ і узгоджуються між собою з хімічною точністю. Для центральної моновакансії знайдено 5–9 реконструкцію з ненасиченим радикалом; MLIP систематично занижує енергію формування на при тій самій топології, що й DFT. Центральна дивакансія дає 5–8–5-реконструкцію з енергією формування нижче за центральну моновакансію.

**Ключові слова**: графенові квантові точки, пірен, точкові дефекти, енергія формування, моновакансія, дивакансія, дефект Стоуна–Уельса, машинно-навчений міжатомний потенціал, теорія функціонала густини.

# FORMATION ENERGIES OF POINT DEFECTS IN PYRENE AS A MINIMAL MODEL OF A GRAPHENE QUANTUM DOT

**Tuzhykov A.[1], Soloviev V.[1], Kiv A.[1,2]**
[1]South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky, Odesa, Ukraine
[2]Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel

**Abstract**. We compute and analyse the formation energies of three classes of point defects – monovacancy, divacancy and Stone–Wales defect – in pyrene $C_{16}H_{10}$ as the smallest model of a graphene quantum dot (GQD). GQDs are promising for electrode materials in batteries and supercapacitors, for catalysis and as fluorescent markers for bioimaging, and their functional properties are governed directly by the type and localisation of defects. Calculations are performed by two methods: density functional theory (DFT) and a universal machine-learning interatomic potential (MLIP). For the central Stone–Wales defect both methods reproduce the canonical 5–7–7–5 reconstruction with a formation energy of ≈2 eV and agree to within chemical accuracy. For the central monovacancy a 5–9 reconstruction is found with an unsaturated radical; the MLIP systematically underestimates the formation energy at the same topology as DFT. The central divacancy yields a 5–8–5 reconstruction with a formation energy lower than that of the central monovacancy.

**Keywords**: graphene quantum dots, pyrene, point defects, formation energy, monovacancy, divacancy, Stone–Wales defect, machine-learning interatomic potential, density functional theory.

**Вступ**. Графенові квантові точки – скінченні нанофрагменти графену з характерними розмірами 1–10 нм – поєднують двомірну ароматику графену з квантовим обмеженням, властивим квантовим точкам [1]. Функціональні характеристики ГКТ (HOMO–LUMO-щілина, локальний магнітний момент, каталітичний центр) визначаються структурними дефектами – моновакансіями (V), дивакансіями ($V_2$) та дефектом Стоуна–Уельса (SW, поворот зв'язку C–C на 90°) [2]. Як обчислювально дешева альтернатива DFT останніми роками виник клас універсальних MLIP на архітектурах графових нейронних мереж [3]. Однак такі потенціали систематично занижують енергії формування дефектів через переважання у тренуванні конфігурацій біля рівноваги [3]. Питання, наскільки цей "софтенінг" переноситься на скінченні H-пасивовані системи (реальні ГКТ), залишається відкритим.

**Мета роботи** – кількісно охарактеризувати енергії формування точкових дефектів (V, $V_2$, SW) у пірені як мінімальній моделі ГКТ та порівняти результати MLIP- та DFT-розрахунків.

**Постановка задачі**. Пірен ($C_{16}H_{10}$) – найменший поліциклічний ароматичний вуглеводень, що несе хімію всіх трьох класів дефектів графену (V, $V_2$, SW), і закріпився у літературі як стандартна молекулярна модель цих дефектів [4, 5].

**Методологія та основна частина**. Гібридний MLIP+DFT-підхід [6] розмежовує дві ролі: MLIP скринінгує всі симетрично нееквівалентні позиції дефектів і будує карту енергетичного ландшафту, DFT уточнює відібраних кандидатів. Структури релаксували у кубічній комірці 30×30×30 $Å^3$ із Г-точкою алгоритмом BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno) до $f_{max}$ = 0.05 еВ/Å. MLIP-калькулятором був SevenNet, DFT-розрахунок – у пакеті GPAW (PAW, спін-поляризація) з функціоналом PBE. Енергії формування рахували за стандартною конвенцією $\Delta E_f = E_{def} - E_0 + n_C \mu_C + n_H \mu_H$ , де $\Delta E_f$ – енергія формування дефекту, $E_{\mathrm{def}}$ та $E_0$ – повна енергія релаксованої дефектної структури, $E_0$ – повна енергія релаксованої ідеальної молекули пірену, $\mu_{\mathrm{C}}$ – енергія атома у досконалому графені, $\mu_{\mathrm{H}} = 1/2\, E(\mathrm{H_2})$:$n_{\mathrm{C}}$ і $n_{\mathrm{H}}$ – кількість видалених атомів вуглецю та водню.

Аналітичним інструментом є посайтове накладання кільцевої топології: після релаксації виявляються кільця розміру 4–12 у графі С-атомів і підсвічуються не-шестичленні (5 → синій, 7 → помаранчевий, 8 → червоний, 9 → фіолетовий). Двопанельне DFT-vs-MLIP накладання подано на Рис. 1–3.

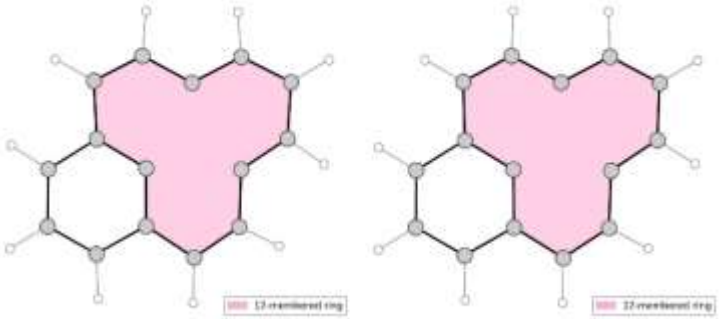


Рис. 1. Центральна моновакансія пірену: *DFT* (ліворуч, $\Delta E_f$ *= 8.06 eB*) та MLIP (праворуч, $\Delta E_f$ *= 7.08 eB).* Обидва методи дають 5–9 ян-теллерівську реконструкцію (синім – пентагон, фіолетовим – нонагон) з ненасиченим радикалом і локальним магнітним [2]

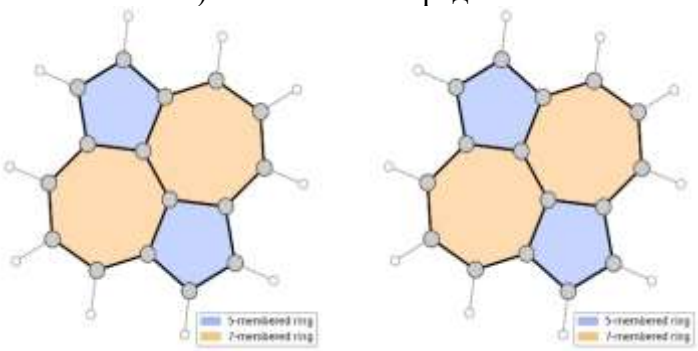


Рис. 2. Центральний дефект Стоуна–Уельса пірену: *DFT* (ліворуч, $\Delta E_f$ *= 1.96 eB*) та MLIP (праворуч, $\Delta E_f$ *= 2.01 eB*). Обидва методи дають канонічну топологію 5–7–7–5 (синім – пентагони, помаранчевим – гептагони) [5]

Для центрального SW MLIP працює практично ідеально: похибка 0.05 еВ при $\Delta E_f^{DFT}$ = 1.96 еВ – рівень хімічної точності. Для центральної моновакансії MLIP систематично занижує енергію формування на ≈1 еВ; знак похибки відповідає типовому "софтенінгу" MLIPs [3], спричиненому переважанням у тренуванні конфігурацій біля рівноваги. Цей ефект підсилює поліradикальний характер моновакансії пірену [4], який у принципі не може бути захоплений однореференсним DFT, – тож софтенінг коректується єдиним сталим зміщенням ≈+1.0 еВ.

Центральна дивакансія пірену реконструюється у канонічну топологію 5–8–5 (один октагон між двома пентагонами, Рис. 3) з $\Delta E_f^{MLIP}$ = 3.01 еВ, тобто на ≈4 еВ нижче за центральну моновакансію. У дивакансії всі обірвані зв’язки погашаються парним відновленням C–C-зв’язків, тоді як у моновакансії один із них залишається ненасиченим [2, 4].

Для моновакансії центральний атом має три обірвані $sp^2$-зв'язки, тому система є сильно полірадикальною з відкритою оболонкою: однореференсний підхід (DFT-PBE) занижує енергію через неспроможність коректно описати квазівироджені конфігурації, а універсальний MLIP, натренований переважно на ближньорівноважних структурах, занижує її ще додатково — він просто не "бачив" таких сильнопотенційних локально-радикальних геометрій у тренувальному наборі. Для дефекту Стоуна–Уельса та дивакансії всі обірвані зв'язки попарно насичуються в реконструкції (5–7–7–5 і 5–8–5 відповідно), радикального характеру нема, тому MLIP відтворює DFT з хімічною точністю.

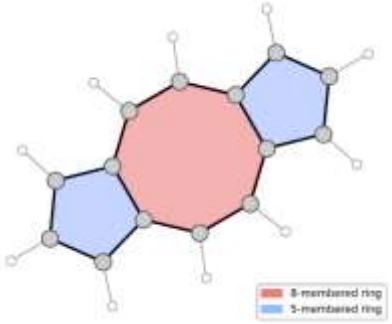



Рис. 3. Центральна дивакансія пірену дає канонічну реконструкцію 5–8–5 (синім – пентагони, червоним – октагон)

**Висновки**. Для центрального SW MLIP відтворює DFT-енергію формування з хімічною точністю (δ = +0.05 еВ при $\Delta E_f^{DFT}$ = 1.96 еВ), що виправдовує MLIP-скринінг SW-ландшафтів у більших ГКТ. Для центральної моновакансії MLIP систематично занижує $\Delta E_f$ на ≈1 еВ при тій самій 5–9 ян-теллерівській реконструкції, що й DFT; цей софтенінг коректується сталим зміщенням. Центральна дивакансія дешевша за центральну моновакансію на ≈4 еВ через парне відновлення C–C-зв’язків у 5–8–5-реконструкції. Отримані значення безпосередньо релевантні для таких застосувань ГКТ, як електродні матеріали акумуляторів і суперконденсаторів, каталіз реакції відновлення кисню та флуоресцентні маркери для біовізуалізації, де роботу пристрою визначає тип та локалізація дефектів. Підсумково, продуктивний MLIP+DFT-конвеєр для ГКТ має MLIP-скринити дефектні ландшафти і використовувати DFT лише для уточнення електронної структури кандидатів.

## Список використаних джерел

1. Geng Z.L., et al. Recent advances on graphene quantum dots and their derivatives for energy storage devices // Int. J. Extrem. Manuf. – 2026. – Vol. 8. – P. 022005.
2. Banhart F., Kotakoski J., Krasheninnikov A.V. "Structural defects in graphene", *ACS Nano* **5** (2011) 26–41Deng B., et al. Systematic softening in universal machine learning interatomic potentials // npj Computational Materials. – 2025. – Vol. 11. – Article 9.
3. Nieman R., Das A., Aquino A.A.J., Amorim R.G., Machado F.B.C., Lischka H. Single and double carbon vacancies in pyrene as first models for graphene defects: A survey of the chemical reactivity toward hydrogen // Chem. Phys. – 2017. – Vol. 482. – P. 346–354.
4. Campisi D., Candian A. Do defects in PAHs promote catalytic activity in space? Stone–Wales pyrene as a test case // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2020. – Vol. 22. – P. 6738–6748.
5. Kiv A., Soloviev V., Tuzhykov A., Kavetskyy T., Hoivanovych N., Šauša O., Rusnák J., Švajdlenková H., Ostrauskaite J., Bielinskyi A., Slusarenko M. Machine learning interatomic potentials and orientational defects in polymers // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. – 2025. – P. 91–104.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF NETWORK TIME SYNCHRONIZATION EFFICIENCY IN A HYBRID MULTI-PLATFORM VIRTUALIZED ENVIRONMENT

**Holovnia O., Falkovskyi I.**
Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

**Abstract.** Network time synchronization is a fundamental requirement for maintaining the integrity and security of computer systems. The purpose of this research is to conduct a comparative analysis of Network Time Protocol (NTP) efficiency across various operating systems (OS) in a hybrid multi-platform virtualized environment. The object of the study is the clock synchronization process on VirtualBox-based hosts. The methods employed involve the deployment of a testbed consisting of five OS: Ubuntu, AlmaLinux, FreeBSD, Windows 10, and Windows Server 2022. Data were collected using custom scripts and included offset, jitter, root delay, and root dispersion. The results of the statistical analysis demonstrate significant performance disparities between the platforms. Ubuntu and AlmaLinux, using the chrony daemon, achieved the highest accuracy. FreeBSD, using the classic ntpd daemon, demonstrated the best network stack performance with the lowest root node latency. Additionally, there was a noticeable difference in accuracy and stability between Windows Server and Windows 10 using the Windows Time synchronization service, with the former providing almost ten times better synchronization. These findings provide critical insights for selecting optimal system configurations for time-sensitive tasks in virtualized infrastructures, including students' lab assignments and scientific projects.

**Keywords:** Network Time Protocol (NTP), Virtualization, Clock Synchronization, Efficiency Metrics, Chrony, Comparative Analysis, Oracle VirtualBox, IT Education.

**Introduction.** Time synchronization is a critical task in computer engineering, providing the accuracy for network traffic management, debugging, security auditing, digital forensics, and other operations that rely on precise timing. Moreover, some services would not function correctly without proper time synchronization, which jeopardizes the reliability, productivity, and security of computer systems.

**The purpose of this work** is to conduct a comparative analysis of network time synchronization efficiency in a multi-platform virtualized environment using Oracle VirtualBox.

**Problem statement.** The time synchronization problem has been investigated by numerous researchers. A number of studies investigate wireless networks ([1-2]). The authors of the paper [3] study the evolution of network time synchronization. In [4], the author proposes an algorithm for time synchronization between virtual machines (VMs) and network simulators. The work also presents results from extensive research on existing time synchronization algorithms, including experimental testing. A number of papers focus on time synchronization techniques in smart grids ([5]). However, existing work either focuses on physical environments or studying virtual containers (e.g., Docker) or Type 1 hypervisors (e.g., KVM, Xen). The choice is understandable, primarily because of higher productivity and the use of open-source components. Meanwhile, a significant proportion of students' lab assignments and scientific projects may also involve Windows hosts and guests. Creating VMs and virtual networks in Hyper-V is not available on hosts running Windows Home Edition, which is a quite common OS on students' laptops. VMware Workstation hypervisor for Windows hosts is currently available for free, but its accessibility is subject to geographically-related verification latencies, which lack explicit documentation (namely, users from Ukraine report numerous issues). VirtualBox is an open-source hypervisor that supports various host and guest OSs (including Windows and Linux). Although it offers lower productivity than the tools discussed above, with appropriate configuration, VirtualBox can be used for projects of different complexity, essentially in educational settings.

The gap between the widespread use of type 2 hypervisors like VirtualBox for lab assignments and other educational needs and, in contrast, the lack of research on the network time

synchronization efficiency of VirtualBox-based virtual infrastructures, underscores the relevance of the study.

**Solving the problem.** The research uses quantitative analysis (for all experimental data) and qualitative analysis (for the literature review). Collecting data has been done through Bash scripts (Linux, FreeBSD) and PowerShell scripts, including *chronyc*, *ntpq*, and *w32tm* commands. Data analysis included visual analysis (boxplots, time-series plots) and statistical analysis (mean, standard deviation, median, and root-mean-square error). The data analysis was performed using the *dplyr, ggplot2, lubridate,* and *scales* libraries in RStudio.

Network Time Protocol (NTP) [6-7] is a widely recognized networking standard for high-precision time synchronization between computers. NTP is based on a multi-level hierarchy (strata) where high-level servers synchronize with reference clock sources (e.g., atomic or GPS-based clocks), while clients synchronize with local NTP servers. The NTP protocol provides high accuracy, accounts for packet transmission latencies, and is thus suitable even for wide-area networks. Key NTP efficiency metrics include *offset* (absolute difference between system time and NTP time), *jitter* (the amount of drift since the last time the reference clock was queried), *root dispersion* (maximum potential error between an NTP client and the reference clock), *root delay* (total round-trip time a packet takes from an NTP client to a primary time source and back), *poll interval* (frequency of requests for time updates from a server).

The model for the study consisted of five virtual hosts with different guest OS (Windows Server 2022, Windows 10, Ubuntu 24.04, Alma Linux 8.10, and FreeBSD 14.3), all running as a testbed in a VirtualBox-based environment (VirtualBox 7.2.6 r172322). The physical host uses OctalCore Intel Core i7-11850H CPU (2500 MGz), 32 GB RAM, and runs Microsoft Windows 10 Pro. All the studied OS were using an Internet connection provided by a VirtualBox NAT connection. The guest additions were turned off for the purity of the experiment, as this mechanism may distort the data. All the virtual hosts were configured to synchronize time using the same server (ntp.time.in.ua). The testbed collected experimental data for 15 hours, including nighttime. So, all the VMs were functioning simultaneously under comparatively similar conditions. On each VM, key metrics have been recorded into standardized log files using Bash scripts (Alma Linux, FreeBSD, Ubuntu) or PowerShell scripts (Windows).

The time-series plots of the offset across all studied OS are shown in Fig. 1 (we used a logarithmic scale to make smaller offset values visible and comparable alongside much larger ones).

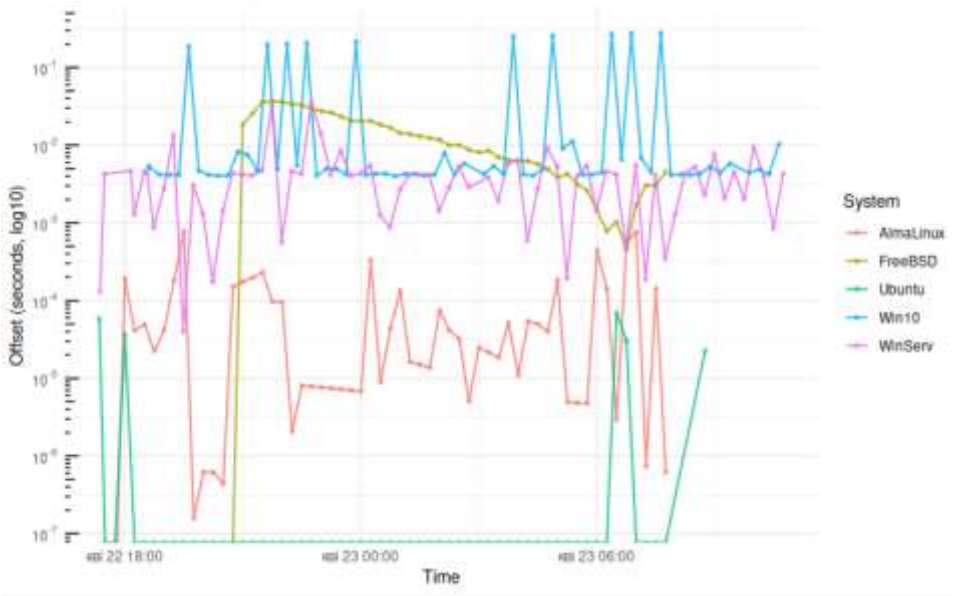



Fig. 1. The offset comparison (logarithmic scale)

The results of the statistical analysis are given in Table 1. According to the result obtained, Ubuntu showed the lowest offset and, consequently, the highest accuracy in network time synchronization. FreeBSD demonstrates a higher offset, but the lowest root delay and, thus, the best efficiency of the network stack in a virtualized environment. Windows 10 had a significantly higher

offset, but Windows 10 and Windows Server demonstrated the lowest jitter and, hence, the lowest amplitude of fluctuations. Alma Linux showed the second-lowest offset, moderate jitter, and moderate root delay. Windows Server had a moderate offset, the second-lowest jitter (based on its median), and moderate root delay.

Table 1

**Descriptive statistics of NTP offset (absolute values), jitter, and root delay**

| OS | Offset | | | | Jitter | | | | Root delay | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mean | SD | Median | RMSE | Mean | SD | Median | RMSE | Mean | SD | Median | RMSE |
| **Ubuntu** | 0,0000036 | 0,0000131 | 0,00000000 | 0,0000135 | 0,000525 | 0,000315 | 0,000526 | 0,000610 | 0,00816 | 0,000377 | 0,00804 | 0,00817 |
| **Alma** | 0,0000970 | 0,0001690 | 0,00002470 | 0,0001940 | 0,000597 | 0,000478 | 0,000466 | 0,000762 | 0,00816 | 0,000257 | 0,00810 | 0,00817 |
| **WinServ** | 0,0046100 | 0,0058200 | 0,00416000 | 0,0073900 | 0,002120 | 0,007980 | 0,000165 | 0,008200 | 0,00960 | 0,003920 | 0,00815 | 0,01040 |
| **FreeBSD** | 0,0133000 | 0,0112000 | 0,00995000 | 0,0173000 | 0,001190 | 0,001170 | 0,000655 | 0,001660 | 0,00784 | 0,000360 | 0,00776 | 0,00784 |
| **Win10** | 0,0408000 | 0,0847000 | 0,00457000 | 0,0934000 | 0,000130 | 0,000437 | 0,000000 | 0,000453 | 0,01070 | 0,003450 | 0,00912 | 0,01120 |

**Conclusions.** The Ubuntu host achieved the best network time synchronization results during the experiment. We suppose it may be due to newer versions of the *chrony* package than those in Alma Linux, which is a more stability-oriented distribution. Ubuntu may also show a shorter response time as a general-purpose distribution. FreeBSD uses the *ntpq* daemon, which is more conservative than *chrony* and takes longer to stabilize the clock. Windows hosts use the *W32Time* service, which does not prioritize time accuracy, but instead tries to keep time accurate enough to support the correct operation of important system procedures (e.g., the Kerberos authentication protocol). Windows Server shows better network time synchronization accuracy than Windows 10, and we assume the difference may be due to better optimization for background processes and regulatory compliance in Windows Server, whereas Windows 10 is more user-oriented. The main limitations of the study are due to the use of virtualization technologies. Although we tried to minimize the distortion caused by the chosen virtualization tools, it still may influence the results. Namely, different guest OS may have different levels of optimization with VirtualBox.

The results of the comparative analysis confirm the importance of selecting both the guest OS and the synchronization service to maintain time integrity in virtual network infrastructure based on Type 2 hypervisors. Future studies should investigate manual tuning of the W32Time service to improve time accuracy in Windows.

## References


1. Abakasanga, E., Shlezinger, N., Dabora, R.: Unsupervised Deep-Learning for Distributed Clock Synchronization in Wireless Networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 72, № 9, P. 12234-12247, (2023). doi: 10.1109/TVT.2023.3269381
2. Thi, M.-T., et al.: IEEE 802.1 TSN Time Synchronization over Wi-Fi and 5G Mobile Networks. 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), P. 1-7, (2022). doi: 10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012852.
3. Chefrour, D.: Evolution of network time synchronization towards nanoseconds accuracy: A survey. Computer Communications. Vol. 191, P. 26-35, (2022). doi: 10.1016/j.comcom.2022.04.023
4. Cosseron, L.: Time-accurate network simulation interconnecting virtual machines with hardware virtualization towards stealth analysis. Université de Rennes, (2025). Access mode: https://theses.hal.science/tel-05446019/
5. Liu, Y., Sun, B., Wu, Y., Zhang, Y., Yang, J., Wang, W., Thotakura, N. L., Liu, Q., Liu, Y.: Time Synchronization Techniques in the Modern Smart Grid: A Comprehensive Survey. Energies. Vol. 18, № 5, P. 1163, (2025). doi: 10.3390/en18051163
6. Mills, D. L., Martin, J., Burbank, J., Kasch, W.: Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification (RFC 5905). Access mode: https://www.rfc-editor.org/info/rfc5905, (2010).
7. Franke, D., Sibold, D., Teichel, E., Dansarie, M., Malhotra, A.: Network Time Security for the Network Time Protocol (RFC 8915). Access mode: https://www.rfc-editor.org/info/rfc8915, (2020).

# PROTOCOLS AND METHODS FOR OPTIMIZING DATA EXCHANGE BETWEEN EDGE AND CLOUD NODES OF MULTIMODAL SYSTEMS

**Orel R., Rozlomii I.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The article investigates the problems of data exchange in multimodal assistants with a distributed edge-cloud architecture. The aim of the work is to develop optimized data transmission methods to reduce latency and improve energy efficiency. The object of study is the data exchange processes between peripheral and cloud computing nodes. The subject of the research encompasses protocols and methods for compression and semantic optimization of multimodal traffic. Methods of system analysis, mathematical modeling, and network theory are utilized. The research proposes a hybrid approach for feature-level fusion and semantic compression on edge devices. This approach enables the transition from transmitting high-dimensional raw data to low-dimensional latent space representations. The study demonstrates that integrating MQTT/gRPC with custom semantic encoders significantly reduces the communication bottleneck. As a result, an approach based on the formation and transmission of a generalized context is proposed, which significantly reduces the load on communication channels and enhances user privacy.

**Keywords**: multimodal assistants, edge-cloud architecture, traffic optimization, generalized context, semantic compression, data fusion.

**Introduction**. The rapid evolution of Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) has led to the emergence of multimodal assistants-systems that interact with the environment through multiple channels: voice, vision, gestures, and sensor data. However, the traditional centralized cloud-based paradigm faces the "data gravity" problem. Real-time processing of high-resolution video streams and LiDAR data requires enormous bandwidth and introduces significant propagation delays. To address these challenges, the edge-cloud architecture has been proposed, where computation is distributed between local devices (edge) and remote data centers (cloud).

**The purpose of the work** is to enhance the operational efficiency and security of multimodal assistants by developing a specialized protocol framework for semantic data exchange and feature-level fusion within a distributed edge-cloud environment.

**Formulation of the problem**. In distributed multimodal systems, the communication link remains the most critical bottleneck. Existing transport protocols like HTTP/1.1 are ill-suited for high-frequency, low-latency exchanges of heterogeneous data. Furthermore, simply offloading raw data to the cloud compromises user privacy. The primary challenge is to synchronize different modalities (e.g., aligning audio and video frames) while minimizing the transmission overhead. There is a clear need for methods that can extract the "semantic essence" of the data locally before it reaches the network interface.

**Solving the problem**. The proposed optimization method is based on two pillars: semantic compression and adaptive protocol selection. Unlike traditional lossy compression (like JPEG or MP3), semantic compression utilizes lightweight neural encoders (e.g., MobileNet-v3 or Tiny-YOLO) located on the edge node to transform raw inputs into a compact latent representation, or "generalized context."

For the communication layer, we compare binary-based protocols (gRPC/Protobuf) and message-oriented protocols (MQTT). While gRPC offers high throughput for point-to-point synchronization, MQTT proves more efficient for asynchronous state updates in low-power edge environments.

The data reduction ratio R can be defined as (1).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{Size}(M_i)}{\mathrm{Size}(V_{context})}, \quad (1)$$

where $M_i$ represents the raw data of the i-th modality and $V_{context}$ is the generated multidimensional context vector. Preliminary tests indicate that for a combined audio-video stream, R can reach values up to 50:1 without significant loss in downstream task accuracy (e.g., intent recognition).

Furthermore, the overall latency L in the proposed hybrid system is modeled as (2).

$$L = T_{f\_ext} + T_{enc} + \frac{S_v}{B} + T_{cloud}, \quad (2)$$

where $T_{f\_ext}$ is the feature extraction time, $T_{enc}$ is the semantic encoding time, $S_v$ is the size of the context vector, B is the available bandwidth, and $T_{cloud}$ is the inference time on the cloud node.

A comparative characteristic of the classical and proposed approaches is presented in Table 1.

Table 1

**Comparative analysis of exchange methods**

| Method | Bandwidth Usage | Latency | Privacy |
|---|---|---|---|
| Raw Data Offloading | High (100%) | 250-500 ms | Low |
| Task Partitioning | Medium (40-60%) | 150-200 ms | Medium |
| **Semantic Context (Proposed)** | **Low (<10%)** | **50-80 ms** | **High** |

**Conclusion**. The research demonstrates that optimizing data exchange via semantic context transmission significantly outperforms traditional cloud-centric models. By shifting the focus from "bit-perfect" transmission to "meaning-perfect" transmission, we achieve a 5× reduction in latency and a massive decrease in network congestion. Future work will involve implementing this protocol using the "Nano Banana" Gemini API framework to test real-time adaptation in varying network conditions.

## References


1. Wu, J., Liu, J., Liu, Y., Wang, L., Wang, Z., Chen, W., Tian, Z., Yu, R., & Leung, V. C. M. (2025). A survey on cloud-edge-terminal collaborative intelligence in AIoT networks. *arXiv*. https://arxiv.org/html/2508.18803v1
2. Musa, A., Kakudi, H., Hassan, M., Hamada, M., Umar, U., & Salisu, M. L. (2025). Lightweight deep learning models for edge devices—A survey. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, *17*, 18. https://doi.org/10.70917/2025014
3. Shi, W., et al. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *3*(5), 637–646. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198
4. Zhang, J., et al. (2023). Multimodal intelligence: A survey on vision, language, and audio fusion. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.01234

# МОДЕЛІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ OFFLINE-FIRST ЗАСТОСУНКІВ

**Дьомін М.К.**
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто проблеми синхронізації даних у mobile offline-first застосунках за умов нестабільного мережевого з'єднання та багатопристроєвого доступу. Проаналізовано моделі остаточної та причинної узгодженості, а також підходи до реалізації алгоритмів синхронізації у розподілених системах. Об'єктом дослідження є процес синхронізації мобільних баз даних із центральною серверною базою даних. Предметом дослідження є алгоритми інкрементальної синхронізації та механізми розв'язання конфліктів. Метою роботи є розробка концепції синхронізації, оптимізованої під домінуючі сценарії використання мобільних застосунків. Запропоновано спрощений алгоритм на основі last-write-wins та розширений алгоритм із використанням журналу змін властивостей. Отримані результати демонструють можливість підвищення ефективності синхронізації та зменшення кількості логічних конфліктів у мобільних offline-first системах.

**Ключові слова:** синхронізація даних, розподілені системи, мобільні застосунки, остаточна узгодженість, журнал змін.

# DATA SYNCHRONIZATION MODELS FOR MOBILE OFFLINE-FIRST APPLICATIONS

**Domin M. K.**
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses data synchronization challenges in mobile offline-first applications operating under unstable network conditions and multi-device access. Eventual consistency and causal consistency models, as well as synchronization approaches for distributed systems, are analyzed. The object of the research is the synchronization process between mobile databases and a centralized server database. The subject of the research includes incremental synchronization algorithms and conflict resolution mechanisms. The aim of the work is to develop a synchronization concept optimized for dominant mobile application usage scenarios. A simplified last-write-wins algorithm and an extended property-level change log synchronization algorithm are proposed. The obtained results demonstrate improved synchronization efficiency and reduced logical conflicts in mobile offline-first systems.

**Keywords:** data synchronization, distributed systems, mobile applications, eventual consistency, change log.

**Вступ.** У сучасних мобільних застосунках часто необхідно забезпечувати підтримку offline-first режиму роботи та синхронізації даних між кількома пристроями. Користувачі очікують, що зміни, виконані без доступу до мережі, будуть коректно синхронізовані після відновлення з'єднання.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка концепції синхронізації мобільних баз даних з центральної серверною базою даних, що максимально відповідає домінуючим сценаріям використання мобільних застосунків.

**Постановка задачі.** Умови нестабільного або переривчастого з'єднання є типовими для мобільних застосунків, тому системи, що намагаються забезпечити сильну узгодженість за будь-яких обставин, неминуче стикаються з блокуванням операцій, що може призводити навіть до повної недоступності сервісу. З цієї причини практичні рішення орієнтуються на моделі остаточної або причинної узгодженості, роблячи акцент на збіжність стану після відновлення комунікації між вузлами [1]. Остаточна узгодженість гарантує, що за відсутності нових записів усі репліки з часом досягнуть однакового стану. Хоча ця модель не забезпечує миттєвої узгодженості, вона добре відповідає вимогам масштабованих розподілених систем [2]. Для мобільних сценаріїв такий підхід є особливо привабливим.

Класичні механізми, такі як логічні годинники Лампорта та векторні годинники, забезпечують засоби для відстеження порядку подій у розподіленій системі та для безпечного застосування оновлень [3].

Незважаючи на наявність численних зрілих фреймворків і керованих сервісів синхронізації, існують вагомі технічні, архітектурні та організаційні підстави для проєктування й упровадження власного алгоритму синхронізації. Суттєвим чинником залишається довгострокова життєздатність і ризик залежності від постачальника.

Надмірна складність часто не виправдана реальними сценаріями використання. Для значної частини сучасних мобільних застосунків характерним є послідовне використання пристроїв одним користувачем, за якого справжні конкурентні редагування трапляються рідко. У таких умовах застосування повнофункціональних механізмів синхронізації може призводити до зайвих витрат ресурсів і ускладнення системи. Отже виникає необхідність у розробці алгоритму синхронізації оптимізованого для домінуючих сценаріїв використання мобільних застосунків.

**Вирішення проблеми.** Зупинимося на базових сценаріях використання мобільних застосунків. Перший сценарій відповідає послідовному використанню пристроїв одним користувачем. За умови коректної синхронізації після завершення сесії всі зміни встигають бути переданими на сервер до початку роботи на іншому пристрої. У такій моделі практично відсутні справжні конкурентні оновлення, а конфлікти мають винятковий характер.

Другий сценарій передбачає квазіпаралельне або одночасне використання кількох пристроїв одним користувачем. У реальних умовах такий сценарій трапляється значно рідше, проте він може виникати як наслідок збоїв синхронізації, зокрема через нестабільне або відсутнє інтернет-з’єднання. У цьому випадку користувач може виконувати зміни на кількох пристроях, не отримуючи актуального стану з сервера, що з погляду системи виглядає як конкурентне редагування. Саме цей сценарій потребує наявності механізмів фіксації змін, виявлення конфліктів і подальшого коректного злиття станів після відновлення зв’язку.

Алгоритм синхронізації має бути спроєктований таким чином, щоб оптимізуватися під перший, домінуючий сценарій, але водночас коректно обробляти другий як граничний випадок. Виділення цих двох сценаріїв створює основу для збалансованого проєктування алгоритму синхронізації.

Алгоритм синхронізації даних у розподілених мобільних системах для першого сценарію постає як компромісне рішення між повноцінною подієво-орієнтованою реплікацією та відсутністю механізмів узгодження змін взагалі. Його ключовою характеристикою є відсутність серверного журналу змін та орієнтація на єдиний часовий маркер — момент останнього оновлення об’єкта. Така модель дозволяє реалізувати синхронізацію з мінімальними обчислювальними витратами та без складних операцій відстеження конфліктів на рівні окремих властивостей. При реалізації спрощеного алгоритму доцільно використання логіки «останній запис перемагає» (last write wins, LWW) на рівні цілого об’єкту (документу) бази даних. Це означає, що будь-яка зміна вважається атомарною: якщо об’єкт має позначку часу, новішу за дані, що надходять від клієнта, то весь пакет оновлень ігнорується.Клієнтський застосунок має гарантувати, що перед надсиланням змін виконується зчитування останнього локального стану, а всі модифіковані властивості фіксуються у вигляді компактного JSON-об’єкта. Також має бути гарантовано, що кожний об’єкт має глобально унікальний ідентифікатор, що можна досягнути завдяки використанню GUID у якості первинного ключа.

Оброблення запиту на синхронізацію виглядає наступним чином. Після отримання HTTP-запиту функція синхронізації: десеріалізує пакет; для кожного об’єкта витягує поточний документ з бази; порівнює часову позначку; або застосовує оновлення, або відкидає його. Усі відкинуті зміни інтерпретуються як наслідок наявності «новішої» версії на сервері, і тому сервер повертає її клієнтові. Така поведінка гарантує узгодженість без конфліктних гілок редагування. Оскільки повторне надсилання тих самих змін не повинно

впливати на стан системи, ідемпотентність досягається природним чином: кожен пакет завжди перевіряється на актуальність незалежно від того, чи бачив його сервер раніше.

Алгоритм синхронізації для другого сценарії, може бути побудований на основі збереження історії змін окремих властивостей об'єкта, є логічним розвитком спрощеної моделі об'єктно-орієнтованого LWW-узгодження. Серверний рівень у даній моделі зберігає не лише консолідований стан об'єкта, але і останні змінені значення для кожного його поля, що дає змогу замінити грубе «перезаписати весь об'єкт» на вибіркове оновлення лише тих властивості, для яких зміна є найновішою. Журнал змін виконує роль незалежного реєстру найновіших версій окремих властивостей об'єкта. Його зміст не дублює повний історичний ланцюжок редагувань, а лише фіксує останню актуальну версію. Під час синхронізації сервер не порівнює об'єкти цілком, а звіряє зміну на рівні ключа для конкретного об'єкту, що усуває зайві конфлікти. Це дозволяє зберегти консистентність стану навіть у випадку, коли два пристрої змінюють різні поля одного й того ж документа у різні моменти часу.

Цей підхід дозволяє застосовувати зміни інкрементально, без перезапису неактуальних полів. Такий механізм забезпечує суттєве зменшення кількості логічних конфліктів у порівнянні з об'єктним LWW-підходом, оскільки конкуренція виникає лише на рівні конкретної властивості, а не всього документа. У результаті система здатна коректно об'єднувати незалежні зміни, виконані на різних пристроях, без втрати даних і без необхідності залучення складних глобальних механізмів упорядкування операцій. Це особливо важливо для мобільних сценаріїв, у яких затримки синхронізації та короткочасні від'єднання є нормою, а справжні семантичні конфлікти трапляються відносно рідко. Водночас запропонований алгоритм зберігає помірну складність реалізації. На відміну від повноцінних CRDT-структур [4] або журналів операцій, журнал змін властивостей не потребує збереження повної історії редагувань і не накладає вимог до глобальної унікальності операцій. Це спрощує серверну логіку, зменшує обсяг метаданих і полегшує подальше обслуговування системи. Видалення попередніх записів для тієї самої властивості дозволяє контролювати зростання changeLog і гарантує, що журнал відображає лише актуальний стан узгодження. У типовому сценарії зберігається лише один запис на властивість, тобто обсяг журналу зростає лінійно від кількості змінюваних полів, а не від кількості синхронізацій.

Цей підхід дозволяє застосовувати зміни інкрементально, без перезапису неактуальних полів. Такий механізм забезпечує суттєве зменшення кількості логічних конфліктів у порівнянні з об'єктним LWW-підходом, оскільки конкуренція виникає лише на рівні конкретної властивості, а не всього документа. Таким чином, розширений алгоритм займає проміжне положення між спрощеним LWW-підходом і більш складними реплікованими моделями. Він оптимізований під домінуючий сценарій послідовного використання пристроїв, але водночас коректно обробляє квазіпаралельні оновлення, спричинені тимчасовою відсутністю мережі. Це робить його практичним компромісом між простотою, ефективністю та коректністю для реальних мобільних застосунків.

**Висновок**. Запропоновано підхід до синхронізації даних у mobile offline-first застосунках, оптимізований під реальні сценарії використання мобільних пристроїв. Використання інкрементальної синхронізації та журналу змін властивостей дозволяє зменшити кількість логічних конфліктів і обсяг переданих даних.

## Список використаних джерел


1. Gilbert S. Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services / S. Gilbert, N. Lynch / ACM SIGACT News, 33(2), 2002. - p 51–59. DOI: 10.1145/564585.564601
2. Vogels W. Eventually Consistent / Communications of the ACM, 52(1), 2008. - p 40–44. DOI: 10.1145/1466443.1466448
3. Lamport L. Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System / Communications of the ACM, 21(7), 1978. - p 558–565. DOI: 10.1145/359545.359563
4. Saito Y. Optimistic replication / ACM Computing Surveys, 37(1) / Y. Saito , M. Shapiro, 2005 p 42–81. URL: https://pages.cs.wisc.edu/~remzi/Classes/739/Fall2015/Papers/saito-optimistic-05.pdf

# АУДИТ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

**Комашко В.В., Гавриш О.С., Воробкало Т.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. В роботі розглянуто результати внутрішнього аудиту стану мережевої інфраструктури ЧДТУ, отримано інформацію про ефективність функціонування ІТ-середовища університету. Результати перевірки вказають на наявність системних проблем, які притаманні більшості вітчизняних закладів вищої освіти. Виявлені проблеми поточної інфраструктури згруповано за чотирма напрямками, а саме: часткова або повна відсутність документації та топологічного контролю, застаріле некероване обладнання, часткове покриття Wi-Fi та відсутність мережевої сегментації і безпеки. На підставі результатів аудиторської перевірки сформовано рекомендації по удосконаленню ІТ-інфраструктури. Запропоновано п'ять груп технічних вимог до модернізованої інфраструктури ЧДТУ: архітектурні та структурні; до продуктивності та відмовостійкості; до бездротової мережі; до безпеки та логічної ізоляції; до моніторингу та адміністрування. Проведений аудит дозволяє оцінити реальний поточний стан інфраструктури ЗВО і сформувати вимоги для її реінжинірингу.

**Ключові слова**: топологія мережі, пропускна здатність, точка доступу, сегментація мережі.

# AUDIT OF THE NETWORK INFRASTRUCTURE OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION

**Komashko V.V., Havrysh O.S., Vorobkalo T.V.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper presents the results of an internal audit of the network infrastructure status at Cherkasy State Technological University (ChSTU), providing insights into the efficiency of the university's IT environment operation. The audit findings indicate systemic issues common to most domestic higher education institutions. Identified problems of the current infrastructure are grouped into four categories: partial or complete lack of documentation and topology control, outdated unmanaged equipment, partial Wi-Fi coverage, and absence of network segmentation and security. Based on the audit results, recommendations for improving the IT infrastructure have been developed. Five groups of technical requirements for the modernized ChSTU infrastructure are proposed: architectural and structural; performance and fault tolerance; wireless network; security and logical isolation; monitoring and administration. The conducted audit enables assessment of the actual current state of the higher education institution's infrastructure and formulation of requirements for its reengineering.

**Keywords:** network topology, bandwidth capacity, access point, network segmentation.

**Вступ.** Сучасний університет функціонує як складна цифрова екосистема, де безперебійна та захищена передача даних є необхідною умовою реалізації навчального процесу, наукових досліджень та ефективного адміністрування. Заклад вищої освіти є одним із найбільш складних з точки зору вимог до мережевої інфраструктури середовищ. На відміну від типового корпоративного офісу, університет поєднує в єдиному інформаційному просторі кілька принципово різних категорій користувачів та сервісів: академічний персонал, здобувачів вищої освіти, адміністративний апарат, а також автоматизовані системи управління, відеоспостереження та контролю доступу. Кожна з цих категорій формує специфічні та часто взаємно суперечливі вимоги до пропускної здатності, рівня захисту та якості обслуговування.

**Постановка задачі.** У сучасній науковій літературі мережева інфраструктура університету розглядається як критичний компонент цифрового кампусу (Smart Campus), що забезпечує інтеграцію освітніх, дослідницьких та управлінських процесів [1]. Зокрема, зростання популярності змішаного (blended) та дистанційного навчання суттєво підвищило вимоги до пропускної здатності та стабільності університетських мереж. Системи управління навчанням (LMS) на кшталт Moodle, платформи відеоконференцзв'язку, хмарні сховища навчальних матеріалів — усі ці сервіси генерують значний, а часом і

непередбачуваний мережевий трафік. Окрему роль відіграє наукова складова діяльності університету. Дослідницька робота передбачає обмін великими масивами даних із партнерськими установами, доступ до міжнародних наукометричних баз та використання розподілених обчислювальних ресурсів. За оцінками GÉANT (Пан-Європейська дослідницька та освітня мережа), середнє споживання трафіку в університетських мережах подвоюється кожні 3–4 роки, що вимагає закладення значного запасу продуктивності ще на етапі проєктування [2]. В зв'язку з цим аудиторська перевірка поточного стану мережевої структури ЗВО є актуальною задачею, оскільки дозволяє виявити слабкі місця, знизити ризики збоїв, намітити шляхи модернізації.

**Мета роботи**. Провести аудит стану мережевої інфраструктури закладу вищої освіти на прикладі Черкаського державного технологічного університету, і сформулювати вимоги для реінжинірингу корпоративної мережі ЧДТУ, що забезпечить високу продуктивність, відмовостійкість, належний рівень кібербезпеки та можливість централізованого управління всіма мережевими ресурсами університету.

**Вирішення проблеми.** Аналіз стану мережевої інфраструктури ЧДТУ здійснювався шляхом технічного аудиту активного та пасивного обладнання, опитування системних адміністраторів університету та безпосереднього обстеження мережевих вузлів. За результатами внутрішнього аудиту виявлено чотири групи критичних проблем, що унеможливлюють подальшу ефективну експлуатацію існуючої інфраструктури.

1. *Відсутність документації та топологічного контролю.* Мережа університету розвивалася стихійно впродовж тривалого часу за принципом «додавання нового поверх старого». Унаслідок цього на момент аудиту відсутні будь-які актуальні схеми підключення — ані фізична (L1), ані логічна (L2/L3) топологія. Кожен збій у мережі вимагає фізичного обходу кабельних трас та перевірки комутаторів, що катастрофічно збільшує середній час відновлення після відмови (MTTR).

2. *Застаріла активна база та некерований парк обладнання.* Основу активного обладнання складають некеровані (unmanaged) комутатори побутового та нижнього корпоративного класу, значна частина яких введена в експлуатацію понад 10 років тому. Використання некерованих комутаторів унеможливлює впровадження VLAN-сегментації, QoS-пріоритизації трафіку, централізованого моніторингу через SNMP або будь-якого іншого засобу управління. Пристрої підключені «гірляндним» методом, що формує єдиний плаский широкомовний домен (Flat Network) в масштабах усього університету.

3. *Часткове покриття бездротової мережі.* Точки доступу Wi-Fi встановлені переважно в коридорах і є або побутовими пристроями, або застарілими корпоративними моделями стандарту 802.11n. Більшість навчальних аудиторій та лабораторій не мають власних точок доступу. Внаслідок цього під час проведення контрольних заходів у системі Moodle (30–35 здобувачів вищої освіти одночасно) коридорні точки доступу перевантажуються, що призводить до критичного зростання затримок, масових розривів з'єднання та фактичної непрацездатності платформи тестування. Відсутня будь-яка система централізованого управління точками доступу: кожна з них налаштована автономно.

4. *Відсутність сегментації та критичні вразливості безпеки.* Унаслідок використання плаского широкомовного домену весь трафік університету — студентський, адміністративний, серверний, а також трафік систем відеоспостереження — передається в одному мережевому сегменті. Будь-який пристрій, підключений до розетки в аудиторії, отримує потенційний мережевий доступ до серверів бухгалтерії, деканатів та інших чутливих адміністративних ресурсів. Відсутні будь-які засоби міжмережевої фільтрації трафіку, автентифікації користувачів або контролю доступу на рівні портів комутатора (802.1X).

Зафіксований стан інфраструктури унеможливлює подальший розвиток цифрового середовища університету та вимагає комплексного реінжинірингу — тобто повного перепроєктування мережі на нових архітектурних засадах, а не часткової модернізації окремих її елементів.

На підставі результатів аудиту та аналізу кращих практик побудови університетських мереж сформовано п'ять груп технічних вимог до модернізованої інфраструктури ЧДТУ.

1. *Архітектурні та структурні вимоги.* Мережа повинна бути побудована за трирівневою ієрархічною моделлю Core–Distribution–Access, що забезпечує чітку структуру, детерміновані маршрути трафіку та легке масштабування. Кожна одиниця активного обладнання (комутатори, маршрутизатори, точки доступу) повинна бути керованою та підтримувати протоколи: SSH/WinBox (управління), SNMP v2c/v3 (моніторинг), LLDP/CDP (автовиявлення топології). Обов'язкова наявність актуальної фізичної та логічної схем мережі, а також маркування всіх портів і кабелів відповідно до стандарту TIA-606.

2. *Вимоги до продуктивності та відмовостійкості.* Магістральні канали між рівнями Core та Distribution повинні мати пропускну здатність не менше 10 Гбіт/с (інтерфейси SFP+). Кінцеві порти для підключення робочих станцій та точок доступу — не менше 1 Гбіт/с. Ядро мережі підлягає обов'язковому резервуванню із забезпеченням автоматичного перемикання на резервний канал у разі відмови основного (VRRP або статичне резервування). Комутатори рівня доступу повинні підтримувати стандарти PoE 802.3af/at для живлення точок доступу Wi-Fi, IP-камер відеоспостереження та контролерів СКУД без прокладання додаткової мережі живлення.

3. *Вимоги до бездротової мережі.* Кожна навчальна аудиторія, лабораторія та адміністративне приміщення повинні мати власну точку доступу Wi-Fi — забезпечення 100% покриття. Точки доступу повинні підтримувати стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax) та витримувати не менше 50–60 одночасних активних сесій (режим тестування у Moodle) без деградації якості зв'язку. Обов'язкове впровадження системи централізованого управління CAPsMAN для автоматичної конфігурації точок, балансування навантаження між каналами 2.4 та 5 ГГц, а також забезпечення безшовного роумінгу для мобільних пристроїв.

4. *Вимоги до безпеки та логічної ізоляції.* Мережа повинна бути сегментована на основі технології VLAN (802.1Q) з ізоляцією трафіку між такими логічними сегментами: управлінський (Management), адміністративний, навчальний (комп'ютерні класи), бездротовий для персоналу, бездротовий для студентів, системи безпеки (IP-CCTV та СКУД). Між сегментами повинна бути запроваджена чітка політика доступу на базі Firewall RouterOS. Необхідна реалізація VPN-шлюзу для захищеного віддаленого доступу адміністраторів та викладачів.

5. *Вимоги до моніторингу та адміністрування.* Система моніторингу повинна забезпечувати: побудову інтерактивної карти мережі у реальному часі (MikroTik The Dude), автоматичне виявлення нових пристроїв через LLDP/Neighbor Discovery, сповіщення адміністратора про критичні події (падіння каналу, перевищення порогів завантаженості процесора/пам'яті, перегрів) із доставкою через Telegram або e-mail. Усі пристрої повинні мати синхронізований час (NTP) для кореляції подій у журналах.

**Висновок.** Проведений внутрішній аудит мережевої інфраструктури ЧДТУ виявив системні проблеми, характерні для більшості ЗВО України: відсутність документації, застаріле некероване обладнання, неповне Wi-Fi покриття та брак сегментації/безпеки. Ці недоліки призводять до низької продуктивності, вразливості та неможливості масштабування. Запропоновані п'ять груп технічних вимог (архітектура, продуктивність, Wi-Fi, безпека, моніторинг) забезпечать перехід до трирівневої моделі Core–Distribution–Access з Wi-Fi 6 (802.11ax), сегментацією VLAN, та централізованим керуванням (CAPsMAN). Реінжиніринг знизить MTTR, підвищить пропускну здатність до 10 Гбіт/с та відповідність стандартам кібербезпеки. Аудит створює основу для цифрової трансформації ЗВО та цільового реінжинірингу мережевої інфраструктури.

## Список використаних джерел


1. Jurva, R., Matinmikko-Blue, M., Niemelä, V. et al. Architecture and Operational Model for Smart Campus Digital Infrastructure. Wireless Pers Commun 113, 1437–1454 (2020). https://doi.org/10.1007/s11277-020-07221-5
2. GÉANT Association. GÉANT Compendium of National Research and Education Networks in Europe. GÉANT, 2023. URL: https://www.geant.org/compendium

# РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ СТИСНЕННЯ ПРОМІЖНИХ КАДРІВ ВІДЕО У ВЕБЗАСТОСУНКУ ТА EDGE-ПЛАТФОРМАХ

**Крайник Я.М.[1,2], Доценко Д.В.[1]**
[1] Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, Миколаїв, Україна
[2] Київська Школа Економіки, Київ, Україна

**Анотація.** У тезах узагальнено результати розроблення та експериментальної перевірки комбінованого методу стиснення проміжних кадрів відео. Розроблений метод передбачає використання кількох операцій для виконання стиснення, які застосовуються в залежності від значення пікселів у зображення. Обрані операції є простими тому можуть використовуватися у системах з обмеженими обчислювальними ресурсами. Це дозволяє використовувати розроблений підхід практично для будь-яких платформах, включаючи мікроконтролери. Кадр розглядається як окреме растрове зображення, тому метод не замінює повноцінні відеокодеки з міжкадровим передбаченням, а орієнтований на легке покадрове стиснення для вебзастосунків та edge-платформ.

**Ключові слова:** стиснення зображень, проміжні кадри відео, YCrCb, QOI, Хаффман, Paeth, контейнер .kmr, edge-платформи, PSNR, SSIM.

# DEVELOPMENT AND EVALUATION OF COMBINED METHOD OF INTERMEDIATE FRAMES COMPRESSION IN THE WEB-APPLICATION AND EDGE PLATFORMS

**Krainyk Y.M.[1,2], Dotsenko D.V.[1]**
[1] Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine
[2] Kyiv School of Economics, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The work generalizes findings of the development and experimental evaluation of the combined method of intermediate frames compression. The developed method involves the use of several operations to perform compression, which are applied depending on the value of pixels in the image. The selected operations are simple, so they can be used in systems with limited computing resources. This allows the developed approach to be used for almost any platform, including microcontrollers. The frame is considered as an individual raster image, thus, the method does not substitute fully-fledged codecs with interframe inference but is suitable for the lightweight compression in web applications and edge-platforms.

**Keywords:** image compression, intermediate frames, YCrCb, QOI, Huffman, Paeth, container .kmr, edge-platforms, PSNR, SSIM.

**Актуальність роботи.** Проміжні кадри відео в системах спостереження, потокової аналітики та IoT часто містять значну просторову надлишковість, але передаються або обробляються в умовах обмеженої пропускної здатності, пам’яті та енергоспоживання. Стандартні відеокодеки забезпечують високу ефективність завдяки міжкадровому передбаченню, однак їх складність не завжди прийнятна для простих edge-сценаріїв, швидкого вебаналізу або незалежного покадрового зберігання.

**Мета роботи.** Метою є реалізація та оцінювання комбінованого методу стиснення кадрів із керованим компромісом між якістю реконструкції, розміром контейнера і швидкодією. Наукова новизна полягає у поєднанні блочного вузлового представлення кадру, квантування вузлів, формування базового шару, Paeth-передбачення залишку, Quite OK Image / QOI-кодування та ентропійного кодування вузлових даних алгоритмом Хаффмана в межах єдиного контейнера .kmr.

**Суть запропонованого методу.** Метод формує два потоки даних. Перший описує низькочастотну структуру кадру через квантизовані вузлові точки блочної сітки. Другий містить залишкову інформацію, потрібну для відновлення деталей після реконструкції базового шару. На початку виконується перетворення RGB→YCrCb, що зменшує міжканальну кореляцію та дає змогу окремо працювати з яскравісною і кольоровісними

складовими. Далі кадр ділиться на блоки розміру blockSize, для кожного блока обчислюються вузлові значення, які квантуються параметром discardBits.

З квантизованих вузлів будується базовий шар. У flat-режимі весь блок відновлюється за відповідною вузловою точкою. У smooth-режимі використовується білінійна інтерполяція сусідніх вузлів. Залишок визначається як різниця між початковим кадром і базовим шаром. Перед QOI-кодуванням залишок проходить Paeth-передбачення. Вузлові дані стискаються дельта-кодуванням, RLE та канонічним кодуванням Хаффмана. Контейнер .kmr зберігає службовий заголовок, параметри кадру, QOI-потік залишку та стиснені вузлові масиви каналів Y, Cb і Cr.

**Реалізація.** Вебреалізацію побудовано як клієнт-серверний застосунок на базі Next.js і TypeScript. Клієнтська частина відповідає за завантаження кадру, вибір параметрів blockSize, discardBits і smooth, запуск обробки та відображення статистики. Серверна частина виконує колірне перетворення, формування вузлів, квантування, побудову базового шару, QOI-кодування залишку, стиснення вузлів, формування контейнера та обчислення метрик. Такий поділ спрощує тестування окремих етапів конвеєра і дає змогу накопичувати результати у CSV-логах.

**Експериментальна методика.** Основну серію експериментів виконано на benchmark-наборі real_codec_1000, що містить 1000 зображень без масштабування: 900 фотографічних сцен і 100 синтетичних прикладів. Перевірялися п’ять конфігурацій KMR: B4/D2 flat, B4/D2 smooth, B6/D1 flat, B8/D2 flat та B8/D2 smooth. Загалом проаналізовано 5000 запусків KMR-кодера. Для порівняння використано baseline-файли JPEG, PNG, WebP та AVIF. Розмір KMR оцінювався відносно raw RGB-представлення розміром 3WH байтів, а якість - за MSE (Mean Square Error), PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) і SSIM (Structured Similarity Indexing Method). Основні результати експериментального оцінювання KMR наведено в табл. 1 та на рис. 1.

Таблиця 1

**Якість, ступінь стиснення і швидкодія KMR**

| Конфігурація | Сер. η | PSNR, дБ | SSIM | Кодування, мс/МП | Декодування, мс/МП |
|---|---|---|---|---|---|
| B4/D2 flat | 23.02× | 27.83 | 0.7928 | 90.62 | 66.29 |
| B4/D2 smooth | 9.48× | 25.87 | 0.7542 | 123.05 | 73.87 |
| B6/D1 flat | 32.18× | 27.04 | 0.7459 | 84.20 | 63.36 |
| B8/D2 flat | 52.58× | 25.49 | 0.7072 | 82.54 | 61.74 |
| B8/D2 smooth | 10.20× | 23.57 | 0.6926 | 115.41 | 67.66 |

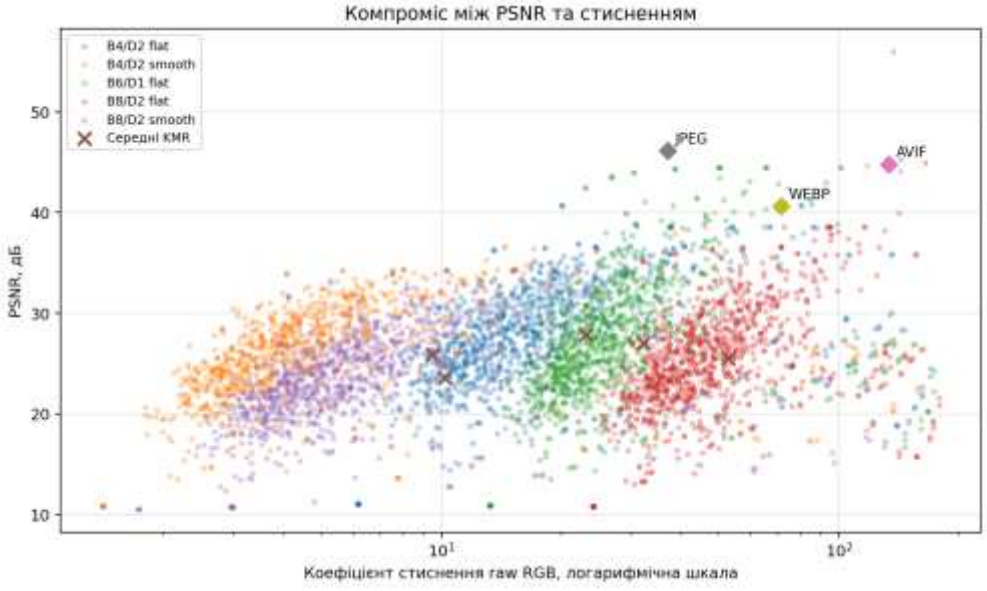



Рис. 1. Компроміс між PSNR і коефіцієнтом стиснення

**Аналіз результатів.** Найкращу середню якість серед протестованих режимів забезпечив B4/D2 flat: PSNR 27.83 дБ, SSIM 0.7928 та середній коефіцієнт стиснення 23.02× (Рис. 2). Найвищий середній коефіцієнт стиснення отримано для B8/D2 flat: 52.58× при PSNR 25.49 дБ і SSIM 0.7072. Режим B6/D1 flat зайняв проміжну позицію: 32.18×, PSNR 27.04 дБ та SSIM 0.7459. Отже, зростання blockSize підвищує компактність, але зменшує точність відтворення дрібних деталей.

Smooth-режими в поточній реалізації не підтвердили очікуваної переваги. Для B4/D2 smooth середній коефіцієнт стиснення становив 9.48×, а для B8/D2 smooth - 10.20×; обидва режими також показали нижчі PSNR і SSIM порівняно з відповідними flat-режимами. Імовірна причина полягає в тому, що інтерпольований базовий шар формує залишок зі статистикою, менш зручною для QOI-кодування.

**Порівняння з baseline-форматами.** Найкомпактніший режим B8/D2 flat був меншим за JPEG у 90.6% запусків, за WebP у 67.3% і за AVIF у 73.8%. Водночас JPEG, WebP та AVIF у тестах використовували quality=85 і забезпечували значно вищі PSNR/SSIM, а PNG був безвтратним baseline із PSNR=∞ та SSIM=1.0000. Тому порівняння слід трактувати обережно: KMR може формувати менший контейнер у частині випадків, але це не доводить універсальної переваги за rate-distortion над стандартними форматами.

**Вплив типу вмісту.** Метод найгірше працював на шумі, line art і текстових сторінках, де переважають різкі високочастотні переходи. Для B8/D2 flat шумові зображення мали середній PSNR 10.81 дБ і SSIM 0.0229. Найкращі результати спостерігалися на градієнтах, регулярних патернах, UI/blocks-сценах і кадрах із великими плавними областями. Кореляція edge_density з PSNR для B8/D2 flat становила -0.683, що підтверджує чутливість методу до насиченості контурами.

**Апробація на edge-платформах.** Окрім вебзастосунку, метод апробовано на Raspberry Pi 4 та STM32F746G-DISCO. Для Raspberry Pi 4 у камерному потоці 640×480 зафіксовано 25-30 FPS, затримку 30-45 мс і коефіцієнт стиснення 2.14×-7.74× залежно від параметрів. Для STM32F746G-DISCO у роздільності 480×272 режим B8/D2 забезпечив близько 288 мс на кадр і орієнтовно 6.0× стиснення. Ці стенди демонструють переносимість конвеєра, але не є прямим продуктивнісним порівнянням платформ.

**Висновки.** Запропонований KMR-конвеєр поєднує блочне вузлове представлення, квантування, базовий шар, Paeth-передбачення, QOI-кодування залишку та Хаффманове кодування вузлів у прозорому контейнері .kmr. Для пріоритету якості доцільним є B4/D2 flat, а для максимальної компактності B8/D2 flat. Smooth=true не слід використовувати як базовий режим поточної реалізації без додаткової оптимізації. Метод придатний для покадрового стиснення, де важливі незалежність кадрів, простий декодер і контрольовані параметри, але він не замінює повноцінні відеокодеки з компенсацією руху. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптивний blockSize, окреме квантування Y/Cb/Cr, edge-aware інтерполяцію, ефективніше entropy-кодування залишку, абляцію компонентів і легке міжкадрове передбачення.

## Список використаних джерел


1. Krainyk Y. M., Dotsenko D. V. Method of Image Compression Using Image Preprocessing, and Huffman and Quite Ok Image Algorithms. Elektronnoe modelirovanie. 2024. Vol. 46, No. 2. P. 67-80. https://doi.org/10.15407/emodel.46.02.075
2. Wallace G. K. The JPEG Still Picture Compression Standard. Communications of the ACM. 1991. Vol. 34, No. 4. P. 30-44.
3. Dominic S. QOI - The Quite OK Image Format. URL: https://qoiformat.org/qoi-specification.pdf.
4. Huffman D. A. A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes. Proceedings of the IRE. 1952. Vol. 40, No. 9. P. 1098-1101.
5. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13, No. 4. P. 600-612.

# ІНТЕГРАЦІЯ ВЕБОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ У ЦИФРОВЕ ОСВІТНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ ЄДИНОГО ОБЛІКОВОГО ЗАПИСУ КОРИСТУВАЧА

**Франчук В.М.**
Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

**Анотація**. У роботі досліджено теоретичні та практичні аспекти інтеграції веборієнтованих систем у цифрове освітнє середовище закладу вищої освіти. Метою дослідження є обґрунтування ефективності використання єдиного облікового запису користувача (Single Sign-On, SSO) для підвищення доступності освітніх сервісів і забезпечення належного рівня інформаційної безпеки. Об'єктом дослідження є цифрове освітнє середовище університету, а предметом – процес інтеграції вебсервісів на основі сучасних протоколів автентифікації. У роботі використано методи системного аналізу, структурно-функціонального моделювання, порівняльного аналізу технологій автентифікації та узагальнення практичного досвіду впровадження. Результати дослідження полягають у розробленні та обґрунтуванні моделі інтеграції веборієнтованих систем університету, використання якої базується на використанні SSO, централізованому управлінні доступом і застосуванні засобів моніторингу та виявлення кіберзагроз. Обґрунтовано, що впровадження єдиного облікового запису дозволяє підвищити ефективність освітнього процесу, зменшити адміністративне навантаження та забезпечити комплексний підхід до захисту інформаційних ресурсів.

**Ключові слова**: цифрове освітнє середовище, веборієнтовані системи, SSO, інформаційна безпека, кібербезпека, хмарні сервіси.

# INTEGRATION OF WEB-BASED SYSTEMS INTO A DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASED ON A SINGLE USER ACCOUNT

**Franchuk V.**
Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper examines theoretical and practical aspects of integrating web-based systems into the digital educational environment of a higher education institution. The aim of the study is to justify the effectiveness of using a Single Sign-On (SSO) mechanism to improve access to educational services and enhance information security. The object of the study is the digital educational environment, while the subject is the integration of web services based on modern authentication protocols.

The research methods include system analysis, structural modeling, comparative analysis of authentication technologies, and generalization of implementation practices. The results demonstrate an effective integration model based on SSO, centralized access management, and the use of monitoring and intrusion detection systems. The proposed approach improves usability, reduces administrative complexity, and ensures a comprehensive level of cybersecurity.

**Keywords**: digital educational environment, web-based systems, single sign-on, information security, cybersecurity, cloud services.

**Вступ**. Цифрова трансформація системи вищої освіти супроводжується активним впровадженням веборієнтованих інформаційних систем, які забезпечують підтримку навчального процесу, наукової діяльності та управління освітньою установою [6]. Використання таких систем створює передумови для формування відкритого, гнучкого та масштабованого освітнього середовища, орієнтованого на потреби користувачів. Разом із тим, збільшення кількості цифрових сервісів призводить до ускладнення управління доступом до них, що негативно впливає на зручність використання систем та рівень інформаційної безпеки [2]. У цих умовах особливої актуальності набуває інтеграція веборієнтованих систем у єдину цифрову екосистему.

**Мета роботи**. Метою роботи є обґрунтування ефективності використання технології єдиного облікового запису користувача для інтеграції веборієнтованих систем та підвищення рівня функціонування цифрового освітнього середовища.

**Постановка задачі**. Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій та їх активне впровадження у сферу вищої освіти зумовлюють необхідність переходу до інтегрованих цифрових освітніх середовищ, що базуються на використанні веборієнтованих систем. Такі системи забезпечують доступ до освітніх ресурсів у режимі реального часу, підтримують різні форми навчання та створюють передумови для масштабування освітніх сервісів. Водночас їх фрагментарне впровадження призводить до виникнення низки системних проблем, пов'язаних із дублюванням функціональності, розпорошенням даних, ускладненням адміністрування та зниженням рівня інформаційної безпеки.

Особливої актуальності набуває проблема організації доступу користувачів до множини інформаційних ресурсів, що функціонують у межах єдиної інфраструктури. Використання окремих облікових записів для кожного сервісу ускладнює процес автентифікації, підвищує ризик компрометації облікових даних і негативно впливає на користувацький досвід. Крім того, відсутність централізованого управління доступом ускладнює реалізацію політик безпеки та аудит дій користувачів.

У цьому контексті постає науково-практична задача розроблення ефективної моделі інтеграції веборієнтованих систем у цифрове освітнє середовище закладу вищої освіти, яка забезпечує узгоджену взаємодію між компонентами системи, централізоване управління ідентифікацією користувачів та високий рівень інформаційної безпеки. Важливою складовою цієї задачі є обґрунтування доцільності використання технологій єдиного входу (англ. Single Sign-On, SSO) та визначення умов їх ефективного застосування в освітньому середовищі.

**Вирішення проблеми**. Розв'язання поставленої задачі ґрунтується на застосуванні системного підходу до інтеграції веборієнтованих сервісів, який передбачає створення єдиної цифрової екосистеми з централізованим управлінням доступом та уніфікованими механізмами передавання даних між її компонентами. Основою такої інтеграції є використання сучасних вебтехнологій і стандартів автентифікації, що забезпечують безпечний обмін даними між інформаційними системами.

Ефективність використання веборієнтованих систем у цифровому освітньому середовищі проявляється у кількох ключових аспектах. По-перше, веборієнтована архітектура забезпечує незалежність доступу до ресурсів від географічного розташування користувача та типу пристрою, що є критично важливим для реалізації змішаного та дистанційного навчання. По-друге, такі системи характеризуються високою масштабованістю, що дозволяє адаптувати інфраструктуру до зростаючого навантаження без суттєвих витрат на її модернізацію. По-третє, інтеграція з хмарними сервісами забезпечує гнучкість у керуванні ресурсами та підвищує надійність зберігання даних.

Ключовим елементом запропонованого підходу є впровадження механізму єдиного облікового запису користувача, який реалізується на основі протоколів SAML, OAuth 2.0 та OpenID Connect. Це дозволяє централізувати процес автентифікації та забезпечити єдину точку входу до всіх освітніх сервісів, включаючи систему Moodle [1], хмарні платформи Google Workspace та Microsoft 365, а також інші вебресурси університету.

З позицій інформаційної безпеки запропоноване рішення дозволяє реалізувати централізовану політику управління доступом, що включає використання багатофакторної автентифікації, контроль сесій користувачів та аудит їхньої активності. Додатковий рівень захисту забезпечується шляхом використання систем моніторингу Zabbix [5] та виявлення вторгнень Wazuh [4], використання яких дозволяють здійснювати безперервний аналіз стану інфраструктури та своєчасно виявляти аномальні події.

Важливим аспектом є також диференціація доступу до різних типів ресурсів. Зокрема, адміністративні системи, такі як ISPConfig та Proxmox VE [3], функціонують у відокремленому середовищі та не інтегруються до SSO, що дозволяє зменшити ризики несанкціонованого доступу до критичної інфраструктури.

Основні причини такого рішення включають:

– *Функціонування у відокремленому середовищі*. Ці системи працюють в ізольованому сегменті інфраструктури, що створює додатковий бар'єр для потенційних зловмисників.

– *Мінімізація ризиків*. Відсутність інтеграції з загальною системою SSO дозволяє суттєво зменшити ризики несанкціонованого доступу до критичної інфраструктури університету.

– *Диференціація доступу*. У запропонованій моделі застосовується чіткий поділ ресурсів: освітні сервіси (Moodle, Google Workspace тощо) доступні через SSO для зручності користувачів, тоді як критично важливі адміністративні інструменти залишаються за межами цієї системи для забезпечення максимального рівня захисту.

Ізоляція таких систем, як ISPConfig та Proxmox VE є частиною стратегії комплексного підходу до захисту інформаційних ресурсів, де критичні вузли керування відокремлені від загального користувацького середовища

Таким чином, запропонований підхід до інтеграції веборієнтованих систем забезпечує підвищення ефективності функціонування цифрового освітнього середовища за рахунок оптимізації доступу до ресурсів, зниження адміністративного навантаження, підвищення рівня інформаційної безпеки та створення умов для подальшого розвитку веборієнтованих сервісів. Його впровадження формує основу для подальшої інтеграції технологій штучного інтелекту, зокрема для аналізу поведінкових патернів користувачів і прогнозування кіберзагроз.

Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) є перспективним напрямом розвитку запропонованої моделі інтеграції веборієнтованих систем. Основні механізми, за допомогою яких ШІ може прогнозувати та виявляти кіберзагрози в середовищі SSO, включають:

– *Аналіз поведінкових патернів*. ШІ може використовуватися для постійного вивчення типової поведінки користувачів під час автентифікації та роботи в системі.

– *Виявлення аномальних подій*. На основі аналізу великих масивів даних, які збираються системами моніторингу (такими як Zabbix та Wazuh), використання ШІ дозволить ідентифікувати відхилення від норми, що можуть свідчити про спроби несанкціонованого доступу або компрометацію облікових даних.

– *Адаптивне управління доступом*. Впровадження ШІ дозволяє системі динамічно реагувати на рівень ризику, змінюючи вимоги до автентифікації в режимі реального часу залежно від виявлених загроз.

– *Прогнозування загроз*. Завдяки аналізу тенденцій та виявленню прихованих зв'язків у логах активності, за допомогою ШІ можна передбачати можливі вектори атак до того, як вони завдадуть суттєвої шкоди інфраструктурі.

Централізована архітектура SSO створює ідеальну базу для навчання таких моделей ШІ, оскільки вона забезпечує єдину точку збору даних про активність усіх користувачів у межах цифрової екосистеми університету.

**Висновок**. Запропонований підхід до інтеграції веборієнтованих систем у цифрове освітнє середовище забезпечує підвищення ефективності доступу до ресурсів, зменшення адміністративного навантаження та посилення інформаційної безпеки. Використання єдиного облікового запису користувача є ключовим елементом побудови сучасної цифрової інфраструктури університету. Перспективи подальших досліджень пов’язані з інтеграцією технологій штучного інтелекту для аналізу поведінки користувачів, виявлення кіберзагроз та адаптивного управління доступом.

## Список використаних джерел


1. Moodle Docs. URL: https://docs.moodle.org.
2. Pratama A. R., Firmansyah F., Rahma F. Security awareness of single sign-on account in the academic community // PeerJ Computer Science. 2022. Vol. 8. Article e918. DOI: 10.7717/peerj-cs.918.
3. Proxmox VE Documentation. URL: https://pve.proxmox.com.
4. Wazuh Documentation. URL: https://documentation.wazuh.com.
5. Zabbix Documentation. URL: https://www.zabbix.com/documentation.
6. Франчук В.М. Методика навчання інформатичних дисциплін в педагогічних університетах з використанням веб-орієнтованих систем: монографія. Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2020. 434 с.

# LEAKAGE-CONTROLLED IDS-BASED RISK PRIORITIZATION FOR IOT DEVICES

**Bondarenko O., Borysenko I.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper investigates how the choice of data splitting protocol affects the evaluation of machine learning intrusion detection systems for the Internet of Things and how this propagates to the quantitative prioritization of device risks. The goal is to integrate leakage-controlled IDS evaluation with a formalized procedure for risk quantification. The object of the research is a network IDS for IoT traffic. The subject is the sensitivity of detection-based risk indicators to the data splitting strategy. To prevent statistical overlap between training and test samples, two evaluation modes are implemented: UID-holdout and scenario-holdout. A reproducible reformulation of FMEA components is proposed, in which Severity, Occurrence and Detection are calculated from IDS statistics without expert coefficients, and the Risk Priority Number is obtained as their product. Experiments on the IoT-23 dataset with a Random Forest classifier show that the transition from UID-holdout to scenario-holdout raises the median False Negative Rate from 0.034 to 0.181. The typical ROC-AUC value remains high (median 0.927), but in the worst scenario split it drops to 0.433. The Detection component turns out to be the most sensitive to the evaluation protocol, and it has a strong effect on the device-level RPN ranking.

**Keywords**: Cybersecurity, Internet of Things, Intrusion detection systems, Machine learning, Information leakage, Leakage-controlled evaluation, FMEA, Risk Priority Number.

**Introduction**. The number of IoT devices in corporate and home networks continues to grow, expanding the attack surface. CCTV cameras, routers and various sensors have become regular targets of automated attacks and botnet campaigns, which is confirmed by recent industrial threat reports [1, 2]. Limited computing resources of such devices, simplified authentication, and the lack of firmware updates create additional risks of compromise.

The scale of this threat makes automated detection mechanisms indispensable, since manual monitoring of distributed IoT infrastructures is practically impossible. Network intrusion detection systems based on flow characteristics of IoT traffic are an important line of defense. Much of the current research relies on the IoT-23 dataset [3] as a benchmark. Reviews confirm that machine learning and ensemble methods dominate in IoT-IDS tasks [4, 5], although the question of model generalizability remains open. A separate methodological problem is information leakage between training and test samples, which may cause systematic overestimation of classification metrics [6-8]. The problem is further amplified by the general reproducibility crisis in ML-based research, where benchmark results often fail to transfer to new data even within the same application domain [8]. Since IDS decisions often feed higher-level risk prioritization procedures, the reliability of the evaluation protocol is important not only for the model itself but also for the subsequent risk ranking of devices.

**The purpose of the work** is to develop and experimentally verify an approach for IoT device risk prioritization that combines a leakage-controlled IDS evaluation with a data-driven formalization of the FMEA methodology, and to estimate the sensitivity of the Risk Priority Number to the choice of data splitting protocol.

**Formulation of the problem**. The IoT-23 dataset has a strong scenario-based structure and contains repeated connection identifiers (UIDs). Random data splitting therefore, produces statistical dependence between the training and test subsamples, and this dependence artificially lowers the proportion of missed attacks observed on the test. At the same time, the classic FMEA indicator RPN [9, 10] uses expert scaling of its components, which limits the reproducibility of the results. The task is to combine leakage control at the evaluation stage with a reproducible procedure for calculating S, O and D from IDS outputs, and then to measure how the choice of splitting protocol propagates to the final device ranking. This effect is especially pronounced in IoT traffic, where session lengths are short, the entropy of flows is low, and device behavior contains many repetitive patterns.

**Solving the problem**. The proposed framework consists of two components: a leakage-controlled IDS evaluation protocol and a data-driven reformulation of FMEA.

Two splitting modes are implemented. In UID-holdout, an 80/20 split is performed with grouping by the UID field using GroupShuffleSplit, so that identical connection identifiers never appear in both subsamples at the same time. This removes direct UID-level leakage but still allows the same scenarios in train and test. UID-holdout therefore, estimates the model's stability on new connections within already familiar scenarios, but does not reproduce the situation of a complete change in the scenario context. In scenario-holdout, the test subsample is formed from a subset of scenarios that are not present in the training part, with stratification by device type. The split is accepted only if it satisfies several control conditions: at least 50 positive and 50 negative examples in the test, the positive-class share within the range [0.05; 0.95], at least 50 000 records in the test, and no UID overlap between train and test. If these conditions are not met, the split is regenerated with a new random seed. The scenario-holdout procedure is then repeated for seeds 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 and 49, and the results are reported in two forms: as the median with interquartile range across all seeds, and as the worst-case configuration.

Detection is performed by a Random Forest classifier from the scikit-learn library [11], trained on Zeek conn.log features together with UID-level aggregates (number of flows, total and average duration, duration variance, number of unique responders). This algorithm was chosen because of its ability to work efficiently with tabular features of mixed scales, its robustness to noise, and the absence of rigid assumptions about feature distribution. Aggregate features are computed on the training and test subsamples separately, which prevents transfer of statistics between them. The classification threshold $t^*$ is selected only on the training sample as the value that maximizes the F1-measure on out-of-fold predictions obtained in group-safe cross-validation. After that, the threshold is fixed and applied to the test subsample without further tuning.

The FMEA components are reformulated in a data-driven form at the level of device types. Severity is estimated through the 90th percentile of an integral standardized traffic-intensity indicator computed on malicious connections, and the result is rank-scaled to the interval [1; 10]. Occurrence is obtained from the empirical share of malicious connections for each device type with a smoothed estimator that reduces variance on small samples, and is then linearly scaled to [1; 10]. Detection is derived from a smoothed False Negative Rate, so that a higher proportion of missed attacks gives a higher value of D. The final risk indicator is computed as follows:

$$RPN_d = S_d \cdot O_d \cdot D_d, \quad (1)$$

where $S_d$, $O_d$ and $D_d$ are the Severity, Occurrence and Detection components calculated for device type d.

The experimental evaluation on the IoT-23 dataset shows that the transition from UID-holdout to scenario-holdout degrades threshold-based detection metrics. The aggregated classification results for both modes are given in Table 1.

Table 1

**Classification performance under different splitting protocols**

| Protocol | ROC-AUC | F1 | Recall | FNR | Precision |
|---|---|---|---|---|---|
| Scenario-holdout (median [IQR]) | 0.927 | 0.813 | 0.819 | 0.181 | 0.975 |
| Scenario-holdout (worst-case) | 0.433 | 0.588 | 0.514 | 0.486 | 0.692 |
| UID-holdout | 0.961 | 0.912 | 0.966 | 0.034 | 0.863 |

As can be seen from Table 1, the median False Negative Rate grows from 0.034 to 0.181, and the median Recall drops from 0.966 to 0.819. The typical ROC-AUC stays high (median 0.927), but it exhibits strong sensitivity to the particular test scenarios. In the worst scenario partition the ROC-AUC falls to 0.433. Since RPN is a multiplicative function of S, O and D, even a moderate growth of Detection changes the device-level risk ranking. For the two device categories that contain a sufficient number of positive examples in the test (smart_sensor and smart_camera), both the order of devices and the absolute RPN values differ noticeably between UID-holdout and

scenario-holdout. Among the FMEA components, Detection is the most sensitive to the choice of data splitting protocol, while uncontrolled leakage leads to a systematic underestimation of risk.

An additional observation concerns the stability of ROC-AUC between scenario-holdout seeds. The variability of this metric from seed to seed indicates that the result depends on the concrete set of test scenarios and not only on the model architecture. Reporting both robust statistics (median with interquartile range) and the worst-case partition gives a more realistic view of generalization risk than a single aggregated value. From a practical point of view, this means that a risk assessment without leakage control may produce incorrect priorities in IoT infrastructure protection management.

**Conclusion**. An approach to IoT device risk prioritization is proposed. It combines a leakage-controlled IDS evaluation, based on UID-holdout and scenario-holdout, with a data-driven formalization of FMEA components. The experiments on the IoT-23 dataset demonstrate that the data splitting protocol strongly affects threshold detection metrics and, through the multiplicative structure of RPN, the final device-level risk ranking. The Detection component is the most sensitive to the evaluation protocol. Uncontrolled information leakage leads to a systematic underestimation of the share of missed attacks and, as a result, of the risk. The practical value of the work consists in the possibility of forming more realistic protection priorities in IoT infrastructures where the traffic structure varies between operating scenarios. The obtained results indicate that a leakage-controlled evaluation protocol should be used whenever IDS outputs are integrated into risk management procedures. Without such control, the ranking of devices may reflect the artifacts of the splitting procedure rather than the actual risk level. Further research is planned in several directions: use of other IoT traffic datasets with a wider coverage of device types, study of the influence of different detection models on the stability of the Detection component, extension of the approach to multi-class attack scenarios and multi-level risk models, as well as probability calibration procedures that account for scenario uncertainty.

## References


1. ENISA: ENISA Threat Landscape 2023. European Union Agency for Cybersecurity (2023). https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2023.
2. Palo Alto Networks: Unit 42 IoT Threat Report 2023. Palo Alto Networks (2023). https://unit42.paloaltonetworks.com/iot-threat-report/.
3. Garcia, S., Parmisano, A., Erquiaga, M.J.: IoT-23: A labeled dataset with malicious and benign IoT network traffic. Zenodo (2020). https://doi.org/10.5281/zenodo.4743746.
4. Verma, A., Ranga, V.: Machine learning based intrusion detection systems for IoT applications. Wirel. Pers. Commun. 111, 2287–2310 (2020). https://doi.org/10.1007/s11277-019-06986-8.
5. Ferrag, M.A., Maglaras, L., Moschoyiannis, S., Janicke, H.: Deep learning for cyber security intrusion detection: Approaches, datasets, and comparative study. J. Inf. Secur. Appl. 50, 102419 (2020). https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102419.
6. Kaufman, S., Rosset, S., Perlich, C., Stitelman, O.: Leakage in data mining: Formulation, detection, and avoidance. ACM Trans. Knowl. Discov. Data 6(4), 15 (2012). https://doi.org/10.1145/2382577.2382579.
7. Papernot, N., McDaniel, P., Sinha, A., Wellman, M.P.: SoK: Security and privacy in machine learning. In: 2018 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P), pp. 399–414. IEEE (2018). https://doi.org/10.1109/EuroSP.2018.00035.
8. Kapoor, S., Narayanan, A.: Leakage and the reproducibility crisis in ML-based science. Patterns 4(9), 100804 (2023). https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100804.
9. Filz, M.-A., Langner, J.E.B., Herrmann, C., Thiede, S.: Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. Comput. Ind. 129, 103451 (2021). https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103451.
10. Ervural, B., Ayaz, H.I.: A fully data-driven FMEA framework for risk assessment on manufacturing processes using a hybrid approach. Eng. Fail. Anal. 152, 107525 (2023). https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107525.
11. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., et al.: Scikit-learn: Machine learning in Python. J. Mach. Learn. Res. 12, 2825–2830 (2011).

# A FEDERATED ZERO-TRUST MODEL FOR ARDUINO UNO Q EDGE TELEMETRY IN MULTI-CLOUD IOT ENVIRONMENTS

**Darnapuk Y., Khudolii Y.**
Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

**Abstract**. The paper proposes a federated zero-trust model to verify telemetry from Arduino UNO Q edge nodes in multi-cloud IoT environments. The research problem arises from the use of separate cloud-specific authentication mechanisms, which complicates identity management for portable devices, trust revocation, and consistent access control across multiple cloud platforms. The proposed approach uses a decentralized device identity, signed telemetry messages, timestamp freshness checks, credential status verification, and cloud-specific trust policies. In the prototype scenario, Arduino UNO Q acts as an edge node that generates simulated environmental and tamper-related telemetry and sends it to two independent cloud verification endpoints. Each endpoint independently verifies message integrity, device identity, and contextual trust attributes before returning one of three decisions: accept, mark as suspicious, or reject. The contribution of the work is a lightweight architecture for federated zero-trust verification of edge telemetry, evaluated by authentication latency, payload overhead, revocation response time, and the rejection of replayed or forged messages.

**Keywords**: Zero trust, Decentralized identity, Arduino UNO Q, Edge computing, Multi-cloud IoT, Telemetry verification, Verifiable credentials.

**Introduction**. Multi-cloud IoT systems often rely on different authentication mechanisms for each cloud platform. This creates fragmented identity management and makes it difficult to verify, revoke, or transfer trust decisions between cloud environments [1, 6]. For edge devices, especially embedded or hybrid platforms such as the Arduino UNO Q, this problem becomes more important because the device may send telemetry to multiple cloud services while operating outside a traditional network perimeter [1, 5].

Zero Trust Architecture assumes that no device, user, or service should be trusted by default. Each request must be verified based on identity, context, policy, and resource protection requirements [5].

**The purpose of the work** is to develop a compact federated zero-trust model for Arduino UNO Q edge telemetry verification in a multi-cloud IoT environment using decentralized device identity, digital signatures, timestamp validation, and cloud-specific trust policies.

**Formulation of the problem.** The problem addressed in this work is the lack of a lightweight, portable trust mechanism for Arduino UNO Q edge nodes that interact with multiple independent cloud endpoints. Static API keys or cloud-specific credentials can authenticate a device in one environment, but they do not provide a unified basis for federated trust, message freshness, tamper awareness, or cross-cloud revocation [1, 6]. Therefore, the research task is to define how an edge node can be verified by multiple cloud services without relying on a single cloud-specific identity provider.

**Solving the problem**. To solve the stated problem, a federated zero-trust verification model for Arduino UNO Q edge telemetry is proposed. The Arduino UNO Q is considered an edge node that generates telemetry packets and sends them to two independent cloud verification endpoints. At the initial stage of the research, sensor readings are simulated in order to provide repeatable experimental conditions and to focus the evaluation on identity verification, message integrity, timestamp freshness, and trust-policy enforcement rather than on physical sensor calibration.

The general structure of the proposed model is shown in Fig. 1.

The telemetry packet contains a device identifier, timestamp, environmental values, tamper-related indicators, a credential identifier, and a digital signature. A simplified structure of the signed telemetry packet is shown in Fig. 2.

Before transmission, the payload is digitally signed by the Arduino UNO Q edge node using an EdDSA-compatible mechanism [9]. The signed packet contains the payload, credential identifier, and digital signature, following the general issuer-holder-verifier logic used in verifiable

credential ecosystems [2, 8]. The public key associated with the device identity is available to cloud verifiers through a decentralized or DID-inspired identity record [2, 3, 7]. Therefore, each cloud endpoint can independently verify the origin and integrity of the telemetry it receives without relying on a single cloud-specific identity provider. The use of decentralized identity and verifiable credentials for IoT devices is consistent with recent research on DID/VC-based authentication mechanisms in smart IoT environments [4].

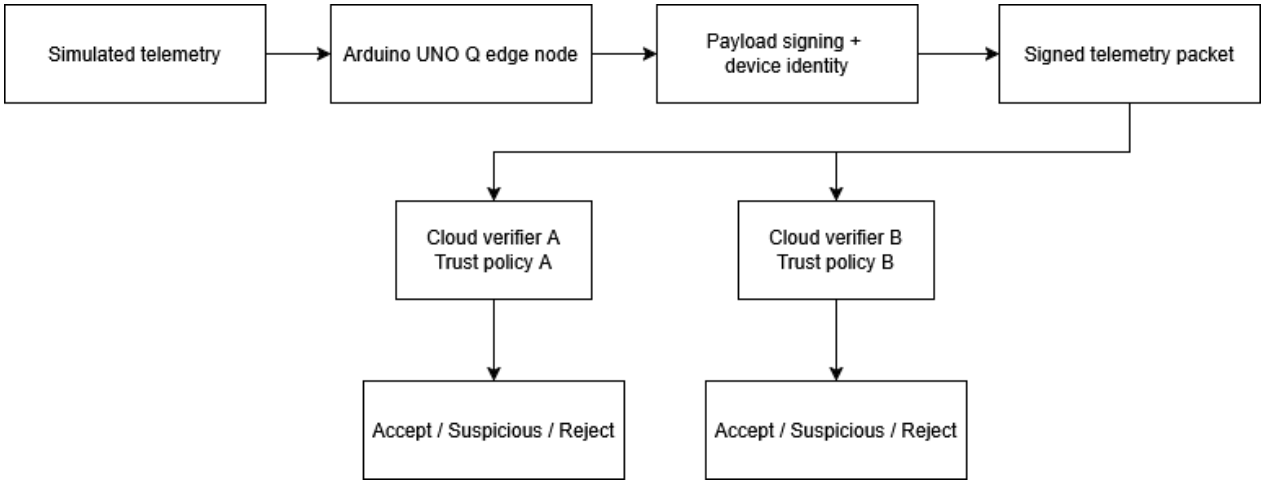



Fig. 1. General architecture of the proposed federated zero-trust telemetry verification model




Fig. 2. Structure of the signed telemetry packet used in the proposed model

Each cloud verifier performs the following checks, which correspond to zero-trust principles of continuous verification, policy enforcement, and context-aware access decisions [5, 6]:

Table 1

**Zero-trust verification checks are performed by each cloud endpoint**

| **Verification step** | **Purpose** |
|---|---|
| Device identity check | Confirms that the device is registered and known |
| Signature verification | Confirms message integrity and origin |
| Timestamp freshness check | Detects replayed or outdated packets |
| Credential status check | Allows revoked devices to be rejected |
| Context-policy check | Analyses telemetry and tamper-related values |
| Cloud-specific policy check | Allows each cloud to make an independent decision |

The trust decision can be represented as a weighted score:

$$T = w_1 I + w_2 S + w_3 F + w_4 C + w_5 P, \quad (1)$$

where $I$ is the result of identity verification, $S$ is signature validity, $F$ is timestamp freshness, $C$ is credential status, and $P$ is the result of telemetry-context policy verification. The coefficients $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$ define the importance of each factor for a specific cloud endpoint.

If the identity, signature, timestamp, and credential status are valid and the telemetry context is normal, the packet is accepted. If the identity and signature are valid but contextual indicators show abnormal behaviour, such as simulated movement or an open enclosure state, the packet is marked as suspicious. If the signature is invalid, the timestamp is outdated, or the credential is revoked, the packet is rejected.

The use of two independent cloud verifiers enables the demonstration of federated trust behaviour. For example, Cloud A may accept telemetry if the signature and timestamp are valid, while Cloud B may apply a stricter policy and mark the same packet as suspicious when a tamper-related value is detected. This reflects the main idea of the proposed model: the device identity is portable, but the final trust decision remains policy-dependent for each cloud environment.

**Conclusion**. This paper introduces a federated zero-trust model for verifying Arduino UNO Q edge telemetry in a multi-cloud IoT environment. The model combines decentralized device identity, signed telemetry, timestamp freshness, credential status, and contextual trust indicators. Simulated sensor data are used at the initial stage to provide repeatable input and to focus the evaluation on trust verification rather than physical sensor accuracy. The model employs two independent cloud verifiers and compares the proposed model against API-key-based telemetry authentication across latency, payload overhead, replay resistance, and revocation-response metrics.

## References


1. Liu, C. et al. Dissecting zero trust: research landscape and its implementation in IoT. *Cybersecurity*, 7, 20, 2024.
2. Mazzocca, C. et al. A Survey on Decentralized Identifiers and Verifiable Credentials. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(6), 3641–3671, 2025.
3. Mühle, A. et al. A survey on essential components of a self-sovereign identity. *Computer Science Review*, 30, 80–86, 2018.
4. Wijesundara, W. M. A. B. et al. DIDAuth-IoTFW: Decentralized firmware authentication for smart home IoT devices using verifiable credentials. *Internet of Things*, 101788, 2025.
5. NIST SP 800-207. *Zero Trust Architecture*, 2020.
6. NIST SP 800-207A. *A Zero Trust Architecture Model for Access Control in Cloud-Native Applications in Multi-Location Environments*, 2023.
7. W3C. *Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0*, 2022.
8. W3C. *Verifiable Credentials Data Model v2.0*, 2025.
9. IETF RFC 8032. *Edwards-Curve Digital Signature Algorithm (EdDSA)*, 2017.

# DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR CLASSIFICATION OF CYBER THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS BASED ON ANOMALIES

**Havrylova A., Tkachov A., Svitlychnyi D.**
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This paper comprehensively explores the current critical infrastructure security landscape, focusing on the development, theoretical justification, and empirical evaluation of advanced cyberattack classification models. The formalization and validation of a new hybrid classification model based on deep mathematical analysis of network traffic dynamics and asynchronous deep packet inspection is proposed. A fundamental and scalable mathematical framework is provided for the development of proactive mitigation strategies that allow for real-time threat categorization to ensure the operational resilience of critical infrastructure in the modern cyberwarfare environment.

**Keywords**: critical infrastructure objects, weight matrix, focal loss function, classification model, attack, random forest, machine learning, performance metrics, technologies.

**Introduction.** The current global security landscape is characterized by a rapid increase in the vulnerability of critical infrastructure (CI) facilities to high-level, persistent cyber threats, which are represented by multi-stage, stealthy intrusions specifically designed not only to steal data or corporate espionage, but also to disrupt operational continuity and cause real damage. Therefore, the need for new, predictive, and highly accurate approaches to classification is of paramount importance.

**The aim of the work** is to develop a lightweight classification model based on statistical traffic dynamics to provide viable and scalable security coverage for both legacy and modern industrial networks.

**Problem Statement.** An in-depth analysis of current attack trends over the past decade demonstrates a conflict between detection accuracy and operational latency in existing machine learning models deployed in these highly critical, deterministic environments.

**Problem Solving.** Current classification paradigms used in critical environments to detect a variety of threats fall into three distinct technological approaches:

- signature-based classification, which is heavily used by traditional intrusion detection systems (IDS) [1] such as Snort or Suricata;
- statistical or heuristic analysis, which establishes mathematical baselines of normal, steady-state network behavior and labels statistically significant deviations as potential attacks [2];
- classical machine learning, using algorithms such as random forests (RF), support vector machines (SVM) with complex kernel tricks, or gradient boosting (GBM) methods [3].

Critical operational shortcomings present fundamental limitations when deployed in real operational ecosystems:

- reliance on superficial packet inspection; class imbalance in training data [4];
- lack of mathematical capabilities, contextual awareness [2];
- architectural memory to classify simultaneous multi-vector attacks when using existing models [3].

To systematically address the above limitations, a novel hybrid classification model based on deep statistical dynamics of network traffic is proposed. The methodology includes continuous, asynchronous flow-based feature extraction combined with optimized, targeted deep packet inspection to construct a multidimensional, time-dependent state vector of the network environment.

To ensure numerical stability, prevent explosive gradients during backpropagation, and stabilize neural network convergence between features of very different scales, strict Z-score normalization is applied to all continuous variables in the feature vector before processing:

$$Z_j = \frac{x_{i,j} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (1)$$

where $x_{i,j}$ represents *the j* -th feature of stream *i*;

$\mu_j$ – calculated average value;

$\sigma_j$ – the standard deviation of this specific feature across the entire educational distribution.

The main goal of classification is to match the normalized feature vector $x_i$ with a specific attack class label $y \in \{0,1,\ldots,K\}$, where $y = 0$ explicitly denotes benign, legitimate traffic, and $y \in \{1,\ldots,K\}$denotes specific, categorized attack vectors. A deep neural network (DNN) is used, parameterized by a weight matrix $\theta$.

The proposed architecture consists of an input layer corresponding to 78 features, followed by four fully connected hidden layers with gradually decreasing dimensionality (256, 128, 64, and 32 neurons, respectively). The mathematical transformation at each hidden layer l is defined as:

$$h^{(l)} = ReLU(W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)}), \quad (2)$$

where $W^{(l)}$ – weight matrix,

$b^{(l)}$ is the displacement vector, and the rectified linear unit (*ReLU*) activation function introduces nonlinearity.

To ensure generalizability, these layers are supplemented with strategically placed dropout layers ($p$ =0.3) that randomly zero out neuronal activation during training to prevent complex coadaptation.

To significantly accelerate neural network convergence and actively mitigate the severe class imbalance inherent in critical infrastructure datasets without relying on imperfect synthetic data generation, a tuned focal loss function is used during the backpropagation optimization phase:

$$L_{FL}(p_t) = -\alpha_t(1 - p_t)\gamma log(p_t), \quad (3)$$

where $p_t$ is the estimated probability of the model for the target class corresponding to the truth;

$\alpha_t$ – balancing weight coefficient assigned to each class;

$\gamma$ – is a focusing parameter (empirically determined) that exponentially reduces the relative contribution of losses from easily classified, mostly benign examples.

By scaling losses, the algorithm with the given architecture is forced to focus its gradient descent updates on difficult classes of minority attacks that ignore traditional cross-entropy losses (Table 1).

Table 1

**Performance comparison of classification models on a custom industrial control systems (ICS) dataset [5]**

| Classification model | Precision | Degree of proximity | Recall | F1-score | False Positive Rate (FPR) | Output delay (ms) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Random Forest (Basic Level) | 0.942 | 0.938 | 0.915 | 0.926 | 2.10% | 12 |
| CNN | 0.965 | 0.959 | 0.942 | 0.950 | 0.85% | 45 |
| **Hybrid DNN (traffic dynamics)** | **0.991** | **0.989** | **0.985** | **0.987** | **0.04%** | **18** |

The proposed deep neural network model was rigorously evaluated against industry-standard benchmarks to comprehensively determine its comparative advantage in both detection accuracy and speed. In particular, its performance was measured using a classical random forest classifier (state-of-the-art surface machine learning) and a standard convolutional neural network (CNN) adapted for traffic ID sequences. The performance metrics used for comprehensive evaluation included overall accuracy, closeness, completeness, harmonic mean F1, and, critically important for operational technology, false positive rate (FPR). In addition, the operational response speed was rigorously measured on standardized edge computing equipment commonly used in electrical substations [6].

The proposed methodology achieved an outstanding overall accuracy of 0.991 and an F1 score of 0.987 for all evaluated attack classes, including the notoriously hard-to-detect FDIA cases that often bypass traditional intrusion detection systems by mimicking legitimate traffic patterns. The false positive rate was maintained at an extremely low level of 0.04%. The real value of this indicator is enormous [7].

**Conclusions:** A comprehensive analysis of today's rapidly changing threat landscape targeting critical infrastructure thoroughly highlights the shortcomings of traditional IT security paradigms when applied to deterministic OT environments where availability is paramount.

To eliminate the shortcomings, this work proposes a mathematically formalized and empirically verified highly optimized anomaly-based threat classification model. It is based on deep statistical traffic dynamics and advanced loss function optimization. By successfully balancing the high-precision capabilities of deep packet inspection with the fast convergence of the neural network, achieved mainly through the strategic mathematical application of focal losses on highly unbalanced datasets, the proposed methodology demonstrated significant improvements in both multifaceted classification accuracy and operational response speed.

Achieving an F1 score of 0.987, which is a critically low false positive rate of only 0.04%, along with an ultra-low processing latency of 18 milliseconds, clearly confirms the practical viability, scalability, and superiority of this approach for real industrial deployment.

## References


1. Igbe O., Darwish I., Saadawi T. Taxonomy of attacks on industrial control protocols, in 2015 IEEE International Conference on Data Communication System and Its Networks (DCSN), pp. 1-6, (2015). https://doi.org/ 10.1109/ICDCSW.2015.15 .
2. Branquinho M. Ransomware in Industrial Control Systems, WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 174, pp. 165-173, (2017). https://doi.org/10.2495/SAFE170301.
3. Wang X., Li C., Ma X., Wang P. Detection of False Data Injection Attacks on Smart Grids Based on A-BiTG Approach, Electronics, Vol. 13, No. 10, p. 1938, (2024). https://doi.org/10.3390/electronics13101938.
4. Unsal DB, Ustun TS, Suhail Hussain SM, Onen A. Enhancing Cybersecurity in Smart Grids: False Data Injection and Its Mitigation, Energies, Vol. 14, No. 9, p. 2657, (2021). https://doi.org/10.3390/en14092657.
5. Intrusion detection evaluation dataset (CIC-IDS2017), (2017) https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html.
6. Alhusain A. SMOTE: Class Imbalance Problem In Intrusion Detection System, 2020 International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT-1441), pp. 1-5, (2020). https://doi.org/10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213728.
7. Patil S., Varadarajan V., Mazhar SM, Sahibzada A., Ahmed N., Sinha O., Kumar S., Shaw K., Kotecha K. Explainable Artificial Intelligence for Intrusion Detection System, Electronics, Vol. 11, No. 19, p. 3079, (2022). https://doi.org/10.3390/electronics11193079.

# SYMBOLIC DIGITAL TWIN FOR INTRUSION DETECTION IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

**Mostovyi O.**
Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Modern satellite communication systems increasingly rely on Delay-Tolerant Networking protocols. The Interplanetary Overlay Network implementation deployed on the International Space Station has been affected by critical vulnerabilities. The existence of such vulnerabilities creates an intrusion-detection gap that general signature- and anomaly-based methods cannot close, motivating the need for binary-level verification of the onboard software that implements these protocols. A Symbolic Digital Twin is presented that performs vulnerability detection by executing instructions over a model of the general-purpose registers and flags and checking constraint-based patterns corresponding to Common Weakness Enumeration vulnerability classes. Integration with the existing intrusion detection system is completed through a Decision Fusion Module that correlates both verdicts and forwards the fused event to a ground-segment Security Information and Event Management platform. The method was validated on NASA's Interplanetary Overlay Network Implementation Delay-Tolerant Networking v4.1.3. All three publicly disclosed vulnerabilities of this version were detected without false negatives. The findings show that constraint-based binary-level verification can extend the resilience of satellite communication systems.

**Keywords**: digital twin, satellite security, delay-tolerant networking, interplanetary overlay network, vulnerability detection, cybersecurity

**Introduction**. Satellite communication systems form critical infrastructure for scientific research, navigation, defense operations, and, increasingly, civilian connectivity. Many of these systems now run general-purpose ARM processors and standardized protocol stacks, with NASA JPL's Interplanetary Overlay Network (ION-DTN) on the International Space Station serving as the reference implementation of Delay-Tolerant Networking [1]. Between October 2024 and March 2025, three memory-safety vulnerabilities, classified as CWE-190, CWE-476, and CWE-456, were publicly disclosed against ION-DTN v4.1.3 [2]. Such defects fall outside the operating functions of the intrusion detection methods currently deployed on space platforms, which motivates the present work [3, 4, 5]. The present work addresses this limitation by introducing an additional detector that operates on the onboard software directly, runs alongside the existing intrusion detection system, and reports its findings to a Security Information and Event Management (SIEM) platform.

**The purpose of the work** is to design and validate an additional detector for satellite intrusion detection systems. The detector should detect memory-safety defects directly at the level of binary instructions, operate in parallel with the existing Intrusion Detection System (IDS) on onboard hardware, and emit events compatible with the native event schemas of ground-segment SIEM platforms.

**Formulation of the problem**. The IDS deployed on satellite systems combines signature-based and anomaly-based engines. Neither engine can recognize a vulnerability that has no prior signature and no representation in the training data, which is the case for memory-safety defects disclosed against a protocol implementation after the satellite has reached orbit. As a result, the satellite remains exposed to such defects until a corresponding signature is delivered and installed during a subsequent on-orbit update. The problem addressed in this work is as follows. Given a protocol function $f$ and an input state $S_0$ derived from a single incoming request, decide whether the execution path of $f$ from $S_0$ enters a state that satisfies a defect predicate from a fixed set of Common Weakness Enumeration classes (CWE) [6]; if so, return the class, the address at which the defect is found, and the corresponding state $S$.

**Solving the problem**. Based on the analysis of the detection gap stated in the previous section, a Symbolic Digital Twin (SDT) of the onboard binary is proposed, which provides binary-level detection of CWE-class defects.

The SDT runs in parallel with the existing intrusion detection system. Each incoming uplink request, whether a BPv7 bundle [7], an LTP segment [8] or a telecommand frame, is delivered to both detectors. The IDS evaluates the request through its signature, statistical anomaly, and protocol-rule engines and produces its verdict; the SDT evaluates the same request against the constraint set over a digital twin of the onboard binary and produces an additional verdict. A Decision Fusion Module (DFM) combines the two verdicts according to a configurable fusion rule and forwards the resulting fused event to the ground-segment Security Information and Event Management (SIEM) platform. The pipeline is depicted in Fig. 1.

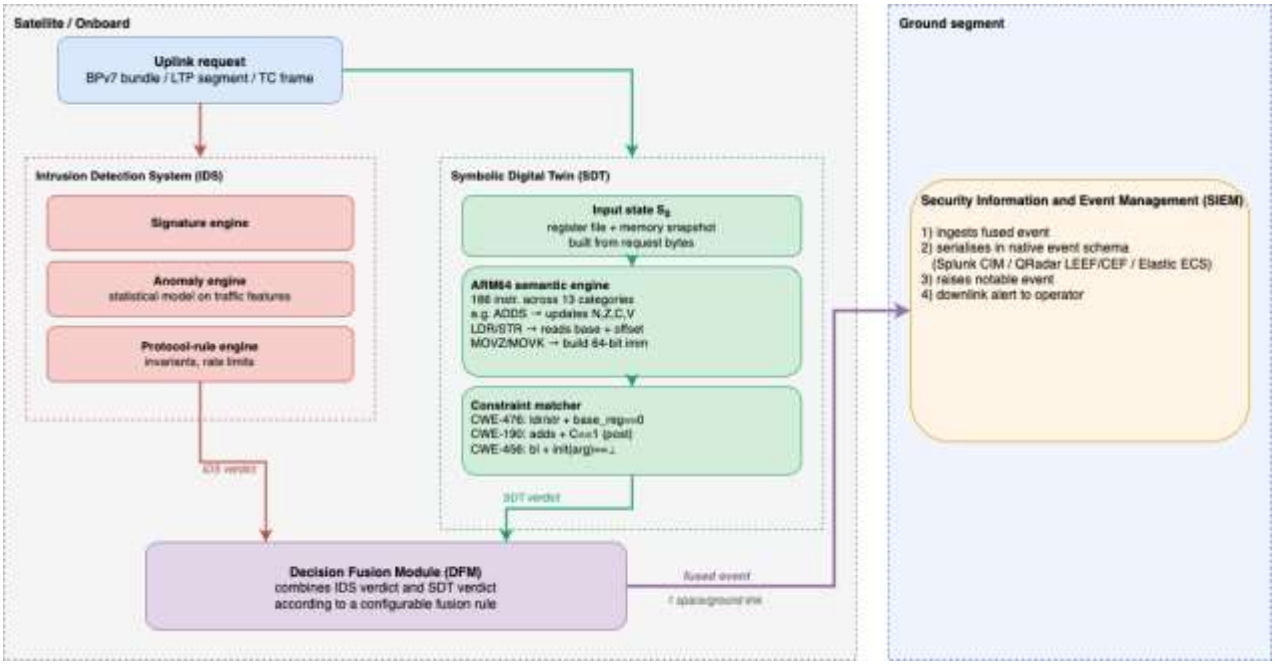



Fig. 1. Architecture

The Digital Twin operates on a state $S$ that comprises the integer and SIMD register file (X0–X30, SP, PC, XZR, V0–V31), the four condition flags NZCV, and the byte-addressable memory image. The instruction semantics is supplied externally as a specification covering 186 ARM64 mnemonics across 13 categories [9]; each entry is given by mnemonic, operand pattern, precondition, postcondition and the subset of NZCV that the instruction updates. Three representative entries presented in Fig. 2.

```
mov(DST, SRC)   – copy SRC→DST, no flags
adds(DST, SRC1, SRC2) – DST←SRC1+SRC2; sets N,Z,C,V
ldr(DST, [BASE,#OFF]) – DST←mem[BASE+OFF]; no flags
```

Fig. 2. Semantics

The successor of $S$ under instruction $i_k$ is denoted $S_{k+1} = \text{Execute}(i_k, S_k)$. Externalising the specification supports auditability and incremental coverage of the instruction set without recompilation of the engine. A constraint is given as a tuple

$$c = \langle cwe,\ \tau,\ \pi,\ \kappa \rangle \tag{1}$$

with $cwe$ a CWE class, $\tau$ a predicate on the mnemonic of $i_k$, $\pi$ a predicate on registers, flags and memory, and $\kappa \in \{pre, post\}$ the evaluation time. The set of all such constraints loaded into the deployment is denoted $\mathcal{C} = \{c_1, c_2, \ldots\}$. The two rules used in the worked example are

$$\varphi_{476} = \langle \text{CWE-476},\ \tau_{\text{ldr}},\ R_{base} = 0,\ pre \rangle. \tag{2}$$

For each protected function $f$, a control-flow graph $G_f = (V_f, E_f)$ is extracted from the compiled ARM64 ELF using angr [10]. Given an incoming request $r$, an initial state $S_0$ is constructed at the entry of $f$; the engine then walks $G_f$, applies Execute to each instruction $i_k$, and

evaluates every $c \in \mathcal{C}$ against $(i_k, S_\kappa)$ at the time κ. The first match returns the verdict tuple to the SIEM, where it is serialised in the native event schema of each platform and the Decision Fusion Module (DFM) raises a notable event according to a configurable fusion rule.

The SDT is verified by modeling three attack requests, each materialized as a static initial state at the entry of the targeted function and corresponding to one publicly disclosed defect. Three vectors verify the SDT against the publicly disclosed defects of ION-DTN v4.1.3.

Vector 1 (CWE-476). The wire frame 03 00 01 00 9F 88 07 00 00 82 01 00 … (34 LTP/BPv7 bytes; 62-byte total frame) carries a BPv7 bundle whose destination EID encodes dtn:none via the CBOR field 82 01 00. The function forwardBundle() is entered with X_0="0x0" and NZCV="0000". After the engine has applied the trace, the rule φ_476 matches at address 0x43bc2c on the load ldr x1, [x0, #8], with state X_0=X_9="0x0" and NZCV="0110".

Vector 2 (CWE-190). The wire frame 03 00 02 00 9F 88 07 00 00 … (44 LTP/BPv7 bytes; 72-byte total) carries a BPv7 bundle with an extension block whose length field 1A FF FF FF FF encodes the CBOR uint32 0xFFFFFFFF. The function acquireExtensionBlock() is entered with X_0="0xFFFFFFFF", X_1="0x10", NZCV="0000". The rule φ_190 matches at address 0x447614 on the 32-bit add adds w2, w1, w0, with X_2="0x0F" and NZCV="0010" (C set on unsigned overflow).

Vector 3 (CWE-456). The wire frame 03 00 03 00 9F 88 07 00 00 82 01 60 … (32 LTP/BPv7 bytes; 60-byte total) carries a BPv7 bundle whose destination EID is the malformed dtn-scheme value [1, ""] encoded as 82 01 60. The function acquireEid() is entered with X_0=X_1="0x0" , NZCV="0000". The rule φ_456 matches at address 0x43a1fc on the call bl parseEidString, with state X_0=X_9="0x0" and NZCV="0110".

In each case, the engine forwards to the SIEM, where it is serialised in the native event schema of each platform and the DFM raises a notable event according to a configurable fusion rule.

**Conclusion**. The analysis of the detection gap of signature and anomaly-based intrusion detection systems against memory-safety defects in satellite software made it possible to propose a binary-level modeling of software implementation, which provided the synthesis of a detection algorithm adaptive to the input state induced by an incoming request. Formulated requirements for the hardware and software implementation define a Symbolic Digital Twin that runs onboard alongside the existing intrusion detection system, with both verdicts fused by an onboard Decision Fusion Module and the resulting event forwarded to a ground-segment SIEM platform; the corresponding structural diagram is shown in Fig.1. All three publicly disclosed memory-safety vulnerabilities of ION-DTN v4.1.3 (CWE-190, CWE-476, CWE-456) were detected without false negatives.

## References


1. NASA JPL: ION-DTN: Interplanetary Overlay Network. GitHub, https://github.com/nasa-jpl/ION-DTN 2024.
2. NASA JPL: ION-DTN Security Advisories (CVE-2024-54130, CVE-2025-61910, GHSA-393w-pfrf-hjp4). https://github.com/nasa-jpl/ION-DTN/security/advisories (2024–2025).
3. Burleigh, S. et al.: Delay-Tolerant Networking: An Approach to Interplanetary Internet. IEEE Communications Magazine, 41(6), pp. 128–136, 2003.
4. Falco, G.: The Vacuum of Space Cyber Security. AIAA SPACE Forum, 2018.
5. Pavur, J., Martinovic, I.: The Cyber-ASAT: On the Impact of Cyber Weapons in Outer Space. In: Proc. IEEE EuroS&PW, pp. 33–38, 2020.
6. MITRE Corporation: Common Weakness Enumeration (CWE), v4.13 (2024).
7. Birrane, E. J. et al.: Bundle Protocol Version 7. RFC 9171, IETF, 2022.
8. Farrell, S. et al.: Licklider Transmission Protocol. RFC 5326, IETF, 2009.
9. ARM Ltd.: ARM Architecture Reference Manual ARMv8-A. ARM DDI 0487, 2023.
10. Shoshitaishvili, Y. et al.: SOK: (State of) The Art of War: Offensive Techniques in Binary Analysis. In: Proc. IEEE S&P, 2016.

# PROACTIVE RANSOMWARE DETECTION METHOD BASED ON ADAPTIVE DECOY STRUCTURES AND KERNEL-MODE FILE OPERATION FILTERING

**Palahin V., Zrazhevskyi O., Palahina O.**
Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko Blvd., 18006, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper presents a method for proactively protecting information resources against ransomware in the Windows operating system, based on the synthesis of adaptive hierarchical structures of honeypot files and low-level filtering of I/O requests in kernel mode using a pre-operation callback in the FS Minifilter driver. The proposed approach ensures the interception of file modification operations before they are executed by the file system driver. Unlike signature-based analysis and API call monitoring, this method detects ransomware attacks at the stage of IRP request initiation in kernel mode, which neutralizes the malware's advantages in encryption speed and the use of known security bypass methods (direct syscalls, unhooking). Testing results on ransomware samples confirmed zero loss of legitimate files, since file operations are blocked in the pre-operation callback before they are executed in the file system driver. The ransomware process is suspended within 7 to 54 ms.

**Keywords:** ransomware, honeypot file, FS Minifilter, kernel-mode protection, information security, proactive protection.

**Introduction.** The urgency of addressing the ransomware threat stems from the rapid growth of the Ransomware-as-a-Service (RaaS) model and the technical sophistication of malware. Modern threats utilize a multithreaded architecture based on Input/Output Completion Ports (IOCP) to achieve high encryption speeds, leaving security systems with minimal time to respond. Furthermore, the evolution of ransomware has led to the widespread adoption of advanced evasion techniques that neutralize traditional endpoint protection. High-profile ransomware families now increasingly utilize direct system calls (Syscalls) and dynamic DLL unhooking to bypass user-mode monitoring and Application Programming Interface (API) hooking. This shift in malware behavior renders traditional behavioral analysis at the user level ineffective, as malicious processes can interact directly with the operating system kernel, invisible to standard security monitors. Consequently, there is a critical need for protection mechanisms that operate at the kernel-mode level, providing deterministic detection before the execution of destructive file operations.

**Problem Statement.** Attackers create unique ransomware samples to bypass signature-based analysis. Existing monitoring methods based on intercepting user-level Windows API functions are vulnerable to unhooking techniques and the use of direct system calls [1, 2]. Protection systems based on event polling have a detection delay during which ransomware has time to encrypt files. It is necessary to address the problem of proactive detection of attacks that use various file system traversing strategies (BFS and DFS). It is also important to address the problem of neutralizing ransomware with the critical process attribute [3] to ensure OS stability.

**The aim of this work** is to improve the speed of detecting and blocking ransomware attacks by developing a method for proactively detecting and blocking attacks based on the synthesis of honeypot files and mechanisms for filtering file operations in kernel mode.

**Solving the problem.** The software implementation of the proposed methods for detecting and neutralizing ransomware attacks consists of an FS Minifilter driver and a user-mode service.

**1. Algorithm for creating honeypot files.** Under normal circumstances, the contents of honeypot files are not modified by legitimate applications or the operating system; therefore, any operation involving writing, renaming, changing attributes, or deleting such files is an indicator that mass file encryption has begun. They mimic valuable files and are placed and named in such a way that ransomware begins encrypting the honeypot files rather than the actual files. It is recommended to create honeypot files in the following locations: root directories of local drives and network storage, the desktop folder, the user profile folder, and folders containing valuable files. Ransomware uses the FindFirstFile/FindNextFile functions, which sort files in alphabetical order in the NTFS file system [4]; therefore, the names of honeypot files begin with the first visible characters of the ASCII encoding so that the honeypot files appear first in the list of files sorted by name. It is also recommended to create additional honeypot files whose names begin with the last

visible characters of the ASCII encoding, in case the ransomware starts processing from the end of the sorted file list. Honeypot files must not be empty and should have common file extensions, such as .zip, .vhdx, .docx, .pdf.

**2. Algorithm for DFS honeypot files**. To counteract the depth-first search (DFS) method, which begins encryption from the deepest directories, an algorithm has been developed to generate a honeypot directory structure with excessive depth. If $Dmax$ is the maximum nesting depth of the user's legitimate directories, then the depth of a trap $d$ in the honeypot tree is determined by a mathematical guarantee of early detection: $\forall d \in HoneypotTree: depth(d) = Dmax + 1$. This forces DFS algorithms to trigger the detector in artificially created directories before encrypting real data.

**3. The logical function of the detector in kernel mode.** The FS Minifilter driver implements a pre-operation callback, where I/O Request Packets (IRPs) are analyzed. The logical function of the $D(Op,fi)$ trigger is defined as: $D(Op, fi) = H(fi) \wedge (Op \in Ocrit)$ where $H(fi)$is the decoy file predicate (the "rnsm_canary" marker in the full file path), and $Ocrit$ is the set of IRP functions: $\{IRP\_MJ\_WRITE, IRP\_MJ\_SET\_INFORMATION, IRP\_MJ\_SET\_EA, IRP\_MJ\_SET\_SECURITY\}$. The driver does not analyze the IRP_MJ_CREATE operation to prevent false positives when opening honeypot files without modifying them.

**4. Algorithm for stopping file encryption**. If $D(Op, fi)$ evaluates to true, the pre-operation callback of the FS Minifilter driver returns the FLT_PREOP_COMPLETE status with the STATUS_ACCESS_DENIED code, blocking the modifying operation to disk. The process ID is added to an internal list of malicious processes to block all of its subsequent IRP requests. Through the communication port, the driver notifies the user-mode service of the detected malicious process. The user-mode service calls the NtSuspendProcess function to suspend all threads of the malicious process. Suspending processes instead of terminating them prevents the CRITICAL_PROCESS_DIED system error from occurring if the ransomware has the critical process attribute and allows a memory dump to be preserved for incident investigation.

**Conclusion.** Experimental testing using WannaCry, Conti, and the RanSim simulator yielded the following results:

- **Detection Time**: 445 ms (RanSim) to 5,885 ms (Conti), corresponding to the moment of the first access to the honeypot file.
- **Process Suspension Time**: 7 to 54 ms after detection.
- **File Loss Count**: 0 decoy files and 0 real files.

The zero loss rate is achieved because, after detecting an attempt to modify a honeypot file, the driver adds the process to the list of malicious processes and blocks further IRP requests from that process in the pre-operation callback - that is, before the IRP request reaches the file system driver and the changes are written to the storage medium. The proposed method is suitable for practical application and demonstrates a high detection and response speed to ransomware due to the determinism of the decoy structures and proactive processing of file operations at the kernel mode.

## References


1. DLL Unhooking / Unprotect Project. URL: https://unprotect.it/technique/dll-unhooking/ (Accessed: April 02, 2026).
2. Full DLL Unhooking with C++. Red Team Notes. URL: https://www.ired.team/offensive-security/defense-evasion/how-to-unhook-a-dll-using-c++ (Accessed: April 02, 2026).
3. So what is a Windows "critical process" anyway? - The Old New Thing. The Old New Thing. URL: http://devblogs.microsoft.com/oldnewthing/20180216-00/?p=98035 (Accessed: April 10, 2026).
4. FindNextFileW function (fileapi.h) - Win32 apps. Microsoft Learn. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/fileapi/nf-fileapi-findnextfilew#remarks (Accessed: April 12, 2026).

# A LOGIT-AND-GAME-THEORETIC TIMING FRAMEWORK FOR FRAUD DETECTION IN FINANCIAL INFORMATION SYSTEMS

**Romanuke V.V.**
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Ukraine

**Abstract.** A timing framework for further balancing the risks of false positives and delayed intervention in fraud-vulnerable financial information systems is presented. The fraud probability is estimated by 22 parameters of the autoregressive logistic regression, based on which the interaction between attacker and defender is modeled as a timing game given the evolving probability. A defender's optimal moment to intervene exists by specifically setting the temporal discretization and scaling costs of one's errors.

**Keywords:** financial fraud detection, fraud probability, logit, defender, timing game, silent duel.

**Introduction.** Financial fraud detection has become a critical component of modern digital payment infrastructures, where millions of transactions are processed in real time. Platforms such as Visa and Mastercard employ advanced information systems that analyze transaction data streams using machine learning and rule-based methods to estimate the probability of fraudulent activity [1]. These systems rely on a wide range of indicators, including behavioral patterns, geographical inconsistencies, device characteristics, and transaction context [2].

In practical settings, fraud is rarely manifested as a single anomalous event. Instead, it typically unfolds as a sequence of transactions, during which suspicious features emerge progressively [3, 4]. As a result, the fraud detection problem is inherently dynamic: the system continuously updates its belief about the legitimacy of ongoing activity based on newly observed signals [5]. This sequential nature introduces a critical decision-making challenge, which consists in determining the appropriate moment to intervene [6, 7].

**Motivation.** Existing fraud detection systems are primarily focused on accurate classification, i. e., estimating the probability that a given transaction is fraudulent [1, 8]. However, in operational environments, the key decision is not only whether a transaction is fraudulent, but also when to take action [9, 10]. Premature intervention (e. g., blocking a transaction or card) may lead to false positives, causing inconvenience to legitimate users and potential loss of customer trust. Conversely, a delayed response increases the risk of financial losses due to successful fraudulent activity. Such situations already remind silent duels modeling timing appropriateness [3, 11, 12].

This trade-off becomes particularly significant in scenarios where fraudulent behavior evolves gradually, allowing attackers to adapt their actions to avoid early detection. In such cases, the defender observes only partial and evolving evidence, while the attacker strategically controls the timing and intensity of suspicious activities. Therefore, the interaction between attacker and defender naturally gives rise to a timing problem under uncertainty [3, 5, 11, 13], which cannot be fully addressed by static classification models alone.

**Goal.** Given a number of $N$ observable features of fraudulent behavior, the goal is to develop a game-theoretic timing framework for fraud detection in financial information systems, which integrates probabilistic classification with sequential decision-making. The framework should model fraud detection as a process based on binary feature indicators that evolve over time and determine the estimated probability of fraudulent activity. Then the interaction between attacker and defender will be represented as a timing game, in which both parties influence the evolution and interpretation of observable signals. Finally, the defender's decision problem will be formalized as an optimal stopping rule, balancing the risks of false positives and delayed intervention.

**Fraud features and probability.** Let the behavior of a transaction sequence be described by a vector of observable binary features:

$$\mathbf{X}(t) = [x_i(t)]_{1\times N} \text{ by } x_i(t) \in \{0,\ 1\}\ \forall\ i = \overline{1,\ N}, \tag{1}$$

where $t$ denotes discrete time (e. g., transaction index or timestamp), and each component $x_i(t)$ represents the presence or absence of a specific indicator associated with potentially fraudulent activity. Each feature $x_i(t)$ corresponds to a detectable anomaly or risk signal generated by the

fraud detection system. These indicators are derived from transaction data and reflect deviations from normal behavior. In the context of real-world financial systems such as Visa or Mastercard, such features are routinely extracted and updated in real time. The binary representation of features is not restrictive, as continuous or categorical variables commonly used in fraud detection systems can be transformed into binary indicators via thresholding or discretization procedures. Without losing generality on enumeration, typical categories of features are presented in Table 1.

Table 1

**Fraud feature categories and their formalization**

| Feature category | Description | Denotation |
|---|---|---|
| Behavioral anomalies (capture deviations from the user's historical transaction patterns | Unusually large transaction amount | $x_1(t)$ |
| | Increased transaction frequency | $x_2(t)$ |
| | Deviation from typical spending profile | $x_3(t)$ |
| Geographic inconsistencies (reflect abnormal spatial behavior) | Transaction from an unusual location | $x_4(t)$ |
| | Geographically inconsistent consecutive transactions | $x_5(t)$ |
| Device and network indicators (relate to the technical environment of the transaction) | Transaction initiated from an unknown device | $x_6(t)$ |
| | Suspicious IP address or anonymization usage | $x_7(t)$ |
| Transaction context features (describe properties of the transaction itself) | Interaction with a high-risk merchant | $x_8(t)$ |
| | Transaction at an unusual time | $x_9(t)$ |
| Global or network-level signals (incorporate aggregated intelligence) | Similarity to known fraud patterns | $x_{10}(t)$ |
| | Involvement in a flagged transaction network | $x_{11}(t)$ |

A key property of the feature vector (1) is its temporal evolution. Features do not necessarily appear simultaneously; instead, they emerge progressively as new transactions are observed. This implies that

$$x_i(t) \leqslant x_i(t+1)$$

for some features, reflecting the accumulation of evidence over time. This sequential emergence of indicators is consistent with observed fraud scenarios, where attackers often begin with low-risk actions and gradually escalate their activity. As a result, the feature vector provides an incomplete and evolving representation of the underlying system state.

Based on the observable feature vector (1), the probability of fraudulent behavior at time $t$ is:

$$p(t) = (1 + \exp[-y(t)])^{-1} \text{ under observations } \{d_r\}_{r=1}^{t-1} \text{ for } d_r \in \{0,\ 1\}$$

$$\text{by } y(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{11} a_i x_i(t) + \sum_{k \in \overline{\{1,\ 11\}} \setminus \{6,\ 7\}} b_k x_k(t-1) + m d_{t-1}, \qquad (2)$$

where $a_0$ is the intercept parameter, $\{a_i\}_{i=1}^{11}$ are 11 predictor parameters,

$$\{b_k\}_{k \in \overline{\{1,\ 11\}} \setminus \{6,\ 7\}}$$

are nine lagged predictor parameters, and $m$ is the lagged response parameter. The 22 parameters of the logistic regression model (2) are estimated using the maximum likelihood [14]. Then the observation $d_t$ at time $t$ is calculated from the probability $p(t)$ for a threshold probability $p_0$ (usually $p_0 = 0.5$ or so):

$$d_t = 1 \text{ if } p(t) \geqslant p_0 \text{ and } d_t = 0 \text{ if } p(t) < p_0.$$

**Timing decision problem.** The probability $p(t)$ by (2) of that the activity is fraudulent evolves over time as features accumulate. The sequential observation is bilateral, so a game emerges over the timing of actions, conditioned on $p(t)$. The attacker chooses the time $\tau_A$ when to execute the decisive fraudulent action (e. g., large withdrawal, final transfer), and the defender chooses the time $\tau_D$ when to intervene (block card, freeze account, request verification). This is exactly a silent duel structure, where there is no direct observation of the opponent's action time and decisions are based on evolving signals. Hence, the defender's payoff $u_D$ must take into account the cost of a false positive (blocking legitimate activity) denoted by $c_{FP}$ and the cost of fraud (missed detection) denoted by $c_{FN}$. The latter can be equal to the gain from stopping fraud. Then the expected defender's payoff is

$$u_{\mathrm{D}}(\tau_{\mathrm{D}},\ \tau_{\mathrm{A}}) = -c_{\mathrm{FP}}(1 - p(\tau_{\mathrm{D}})) + c_{\mathrm{FN}} p(\tau_{\mathrm{D}}) \text{ for } \tau_{\mathrm{D}} < \tau_{\mathrm{A}}$$
$$\text{and } u_{\mathrm{D}}(\tau_{\mathrm{D}},\ \tau_{\mathrm{A}}) = -c_{\mathrm{FN}} \text{ for } \tau_{\mathrm{D}} \geqslant \tau_{\mathrm{A}}. \qquad (3)$$

The attacker's reward from successful fraud by $\tau_D \geqslant \tau_A$ can be normalized to a value $c_{FN}$, and the attacker's loss if blocked by $\tau_D < \tau_A$ is $-u_D(\tau_D, \tau_A)$. In this way, the attacker and defender interact within a timing game, which is a silent duel being a finite zero-sum game by payoffs (3) [15, 16] updated between the neighboring time moments $\tau_1$ and $\tau_2$, where either the fraudulent action or the intervention was successful ($p(\tau_1) \geqslant p_0$ and $p(\tau_2) \geqslant p_0$). Such games always have a maximin solution, and, under specific temporal discretization and payoff scaling by $c_{FP}$ and $c_{FN}$, it is the pure strategy solution, being an optimal stopping rule for the defender at the time moment $\tau_D^*$.

**Conclusion.** The presented framework is a fusion of the logit and game-theoretic timing models for determining a reasonably cautious-and-timely strategy of defending financial information systems. The framework tunable parameters are the observational time step and costs $c_{\mathrm{FP}}$, $c_{\mathrm{FN}}$. The proposed approach is intended to serve as a conceptual foundation for enhancing existing fraud detection with further balancing the risks of false positives and delayed intervention.

## References


1. Carcillo F. *et al.* (2018). SCARFF: A scalable framework for streaming credit card fraud detection with spark. *Information Fusion*, Vol. 41, pp. 182–194. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.09.005
2. Fiore U. *et al.* (2019). Using generative adversarial networks for improving classification effectiveness in credit card fraud detection. *Information Sciences*, Vol. 479, pp. 448–455. https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.12.030
3. Romanuke V. V. (2024). Pure strategy solutions of the progressive discrete silent duel with generalized identical quadratic accuracy functions. *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 349, pp. 215–232. https://doi.org/10.1016/j.dam.2024.02.015
4. Jurgovsky J. *et al.* (2018). Sequence classification for credit-card fraud detection. *Expert Systems with Applications*, Vol. 100, pp. 234–245. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.01.037
5. Baesens B., Van Vlasselaer V., and Verbeke W. (2015). *Fraud Analytics Using Descriptive, Predictive, and Social Network Techniques: A Guide to Data Science for Fraud Detection*. Wiley.
6. Romanuke V. V. (2026). Optimality of internal time moments in 1-bullet silent duels with generalized exponentially-convex rewards. *Statistics, Optimization & Information Computing*. https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-3251
7. Lin W., Shi Y., and Liu Z. (2026). Dynamic multi-level graph enhanced contrastive learning for financial fraud detection. *Pacific-Basin Finance Journal*, Vol. 98, Article no. 103172. https://doi.org/10.1016/j.pacfin.2026.103172
8. Zhang L. *et al.* (2025). A hybrid ensemble model to detect Bitcoin fraudulent transactions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 141, Article no. 109810. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109810
9. Romanuke V. V. (2025). Genetic algorithm for approximation of equilibrium strategies within finite space of actions in bimatrix games for improving telecommunication interactions. *Applied Computer Systems*, Vol. 30, Iss. 1, pp. 166–173. https://doi.org/10.2478/acss-2025-0018
10. Romanuke V. V. (2025). Compliance-and-defiance dilemma game best strategy for three and four agents. *Statistics, Optimization and Information Computing*, Vol. 14, No. 5, pp. 415–433. https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-2370
11. Romanuke V. V. (2025). Optimal timing strategies in blockchain block proposals by one-bullet silent duels with one-third progression. *Information and Telecommunication Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 30–42. https://doi.org/10.20535/2411-2976.12025.30-42
12. Romanuke V. V. (2024). Pure strategy solutions in progressive discrete silent duel with linear accuracy and compactified shooting moments. *Visnyk of the Lviv University. Series Appl. Math. and Informatics*, Iss. 32, pp. 15–27. http://dx.doi.org/10.30970/vam.2024.32.12344
13. Fudenberg D. and Tirole J. (1991). *Game Theory*. MIT Press. https://linkmag.net/s/SPPaWfAV
14. Hosmer D. W., Lemeshow S., and Sturdivant R. X. (2013). *Applied Logistic Regression* (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118548387
15. Romanuke V. V. (2022). Time-unit shifting in 2-person games played in finite and uncountably infinite staircase-function spaces. *Journal of Mathematics and Applications*, Vol. 45, pp. 133–179. https://doi.org/10.7862/rf.2022.7
16. Ferguson T. S. (2020). *A Course in Game Theory*. World Scientific. https://doi.org/10.1142/10634

# ANOMALY DETECTION IN IOT DIGITAL TWINS USING TEMPORAL TELEMETRY ANALYSIS WITH BLOCKCHAIN-VERIFIED EVENT LOGGING

**Rozlomii I.[1], Naumenko S.[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper presents a method for anomaly detection in digital twins of IoT devices based on the analysis of temporal characteristics of telemetry data combined with blockchain-based event verification. The proposed approach focuses on extracting time-dependent features, including inter-arrival intervals, rate of change, and local statistical properties, which allows detecting both explicit and hidden anomalies in device behavior. An anomaly score is calculated using a weighted model that integrates deviations in signal values and temporal patterns. To ensure the integrity and trustworthiness of telemetry data, a blockchain-based logging mechanism is introduced, where each event is recorded as a cryptographically protected transaction. This enables immutable storage and decentralized verification of anomaly detection results without relying on a central authority. The architecture distributes computational tasks between Internet of Things (IoT) devices, digital twins, and edge or blockchain nodes, ensuring efficiency under resource constraints. The proposed method improves detection accuracy and enhances the reliability of monitoring in distributed IoT environments, making it suitable for cyber-physical systems with digital twins.

**Keywords**: digital twins, anomaly detection, IoT devices, temporal telemetry analysis, blockchain verification, cyber-physical systems.

**Introduction.** The rapid proliferation of IoT devices and their integration into cyber-physical environments have led to the widespread adoption of digital twins as virtual representations of physical entities. Digital twins enable continuous monitoring, predictive analysis, and real-time control based on telemetry data streams generated by embedded devices. However, the increasing complexity and distribution of IoT systems introduce new challenges related to the reliability and trustworthiness of telemetry data, particularly under conditions of limited computational resources, network instability, and potential cyber threats [1].

One of the critical issues in such environments is the timely detection of anomalies in the behavior of IoT devices, which may indicate faults, misconfigurations, or malicious activities. Traditional anomaly detection approaches often rely on centralized data processing and assume the integrity of incoming telemetry, which may not hold in distributed and adversarial settings [2]. Moreover, many existing methods do not sufficiently account for the temporal structure of telemetry data, which is essential for representing the dynamics of digital twin states.

In parallel, ensuring the integrity and authenticity of telemetry data becomes increasingly important, especially in scenarios involving multiple interacting digital twins. Blockchain technology offers a promising solution for creating immutable and verifiable logs of telemetry events, enabling decentralized trust without reliance on a central authority [3]. However, the integration of blockchain mechanisms into IoT environments must consider resource constraints and latency overhead.

These challenges necessitate the development of new methods that combine temporal analysis of telemetry data with reliable mechanisms for data verification. In this context, the proposed approach focuses on anomaly detection in digital twins of IoT devices based on temporal characteristics of telemetry, enhanced by blockchain-based event verification, enabling improved detection accuracy and increased trust in distributed environments.

**The purpose of the work** is to develop a method for anomaly detection in digital twins of IoT devices based on temporal characteristics of telemetry data with blockchain-based verification of events, ensuring improved reliability of detection results under resource and trust constraints in distributed environments.

**Formulation of the problem.** To achieve the stated objective, it is necessary to solve the problem of developing a method for detecting anomalies in digital twins of IoT devices that takes into account the temporal characteristics of telemetry data streams and ensures the reliability of

detected events. The method must provide the ability to identify deviations in the behavior of digital twins based on the analysis of time-dependent patterns, including changes in sampling intervals, temporal correlations, and dynamic state transitions. Particular attention should be paid to the detection of subtle anomalies that may not be reflected in instantaneous values but emerge through temporal inconsistencies.

In addition, it is required to ensure the integrity and authenticity of telemetry data used for analysis, which necessitates the integration of a blockchain-based mechanism for event logging and verification. The problem involves designing an approach that enables the formation of immutable and verifiable records of telemetry events without introducing significant computational and communication overhead for resource-constrained IoT devices. It is also necessary to provide compatibility of the proposed method with distributed IoT architectures, where multiple digital twins interact under conditions of limited trust and network instability.

Furthermore, the method should be adaptable to varying data rates and device capabilities, while maintaining a balance between detection accuracy, resource consumption, and latency. The overall challenge lies in combining temporal anomaly detection techniques with decentralized verification mechanisms in a unified model suitable for practical implementation in embedded and edge computing environments.

**Solving the problem.** The proposed method for anomaly detection in digital twins of IoT devices is based on the joint analysis of temporal characteristics of telemetry data and the use of blockchain-based event logging to ensure data integrity and trustworthiness. The overall approach includes three main stages: temporal feature extraction, anomaly detection based on time-dependent patterns, and verification of telemetry events using a distributed ledger.

At the first stage, telemetry data generated by IoT devices are represented as time series $X = \{x(t_1), x(t_2), \dots x(t_n)\}$, where $x(t_i)$ denotes the measured parameter at time $t_i$. In contrast to conventional approaches, the proposed method emphasizes temporal characteristics, including inter-arrival time between measurements $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ as well as higher-order temporal dependencies. For this purpose, a temporal feature vector is constructed for each observation (1).

$$F_i = \{x(t_i), \Delta t_i, \frac{dx}{dt}|_{t_i}, \sigma_w(t_i)\}, \quad (1)$$

where $\frac{dx}{dt}$ represents the rate of change and $\sigma_w$ denotes the local variance within a sliding window.

Anomaly detection is performed by evaluating deviations of the current state from the expected temporal behavior. The expected value $\hat{x}(t_i)$ is estimated using a predictive model based on previous observations (2).

$$\hat{x}(t_i) = f(x(t_{i-1}), x(t_{i-2}), \dots, x(t_{i-k})). \quad (2)$$

The anomaly score is then defined as (3).

$$A_i = \alpha \cdot |x(t_i) - \hat{x}(t_i)| + \beta \cdot |\Delta t_i - \overline{\Delta t}| + \gamma \cdot \left|\frac{dx}{dt}|_{t_i} - \overline{\frac{dx}{dt}}\right|, \quad (3)$$

where $\alpha, \beta, \gamma$ are weighting coefficients, and the overline denotes average values over a reference window. An observation is classified as anomalous if $A_i > \theta$, where $\theta$ is a predefined threshold.

To ensure the reliability of telemetry data, each event is recorded in a blockchain-based log. For each telemetry point, a transaction is formed as (4).

$$T_i = Hash(x(t_i)||t_i||ID||A_i), \quad (4)$$

where $ID$ identifies the device or digital twin. The use of cryptographic hashing ensures immutability and resistance to data tampering. The inclusion of anomaly scores in the transaction allows not only verification of data integrity but also validation of anomaly detection results across distributed nodes.

The proposed method is implemented as a distributed architecture integrating IoT devices, digital twins, temporal analysis and anomaly detection modules, and a blockchain network for secure event logging and verification.

To evaluate the applicability of the proposed method in resource-constrained environments, the distribution of computational overhead between system components is considered. The main operations are summarized in Table 1.

Table 1

**Distribution of computational operations in the proposed method**

| Component | Operations performed | Resource intensity |
|---|---|---|
| IoT device | Data acquisition, timestamping | Low |
| Digital twin | Temporal feature extraction, prediction | Medium |
| Anomaly detection module | Score calculation, threshold comparison | Medium |
| Blockchain layer | Hashing, transaction formation, validation | High |

The analysis shows that resource-intensive operations related to blockchain processing are offloaded from IoT devices to edge or distributed nodes, which allows maintaining system efficiency under constrained conditions. At the same time, temporal analysis remains computationally feasible for embedded platforms due to the use of lightweight models.

Thus, the proposed method provides a unified framework that combines temporal anomaly detection with blockchain-based verification, ensuring both detection accuracy and data trustworthiness in distributed IoT environments.

**Conclusion.** A method for anomaly detection in digital twins of IoT devices based on temporal characteristics of telemetry data with blockchain-based event logging has been proposed. The approach focuses on analyzing time-dependent features of telemetry streams, including inter-arrival intervals, dynamic changes, and local statistical properties, which enables the detection of both explicit and subtle anomalies that are not observable in instantaneous measurements.

The integration of a blockchain mechanism ensures the integrity and authenticity of telemetry events by forming immutable and verifiable records, thereby increasing the level of trust in the obtained detection results in distributed environments. The proposed architecture allows separating resource-intensive operations related to transaction validation from constrained IoT devices by delegating them to edge or distributed nodes.

The developed method provides a balanced combination of detection accuracy, resource efficiency, and reliability, making it suitable for implementation in cyber-physical systems with digital twins. The results confirm the feasibility of combining temporal anomaly detection with decentralized verification mechanisms to enhance the robustness of IoT monitoring systems under conditions of limited resources and potential security threats.

## References


1. Yarmilko A., Rozlomii I., Naumenko S. Dependability of embedded systems in the Industrial Internet of Things: Information security and reliability of the communication cluster. *Information Technology for Education, Science, and Technics.* 2024. Vol. 222. P. 235–249. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_16
2. Singh, S. (2024). A review of spatiotemporal GANs for telemetry data anomaly detection. *Acceleron Aerospace Journal*, 2(3), 195–203. https://doi.org/10.61359/11.2106-2411
3. Morillo Reina, J. D., & Mateo Sanguino, T. J. (2025). Decentralized and secure blockchain solution for tamper-proof logging events. *Future Internet*, 17(3), 108. https://doi.org/10.3390/fi17030108

# TWO-FACTOR AUTHENTICATION METHOD BASED ON ONE-TIME PASSWORD GENERATION

**Titova V.[1], Klots Yu.[1], Anikin V.[1], Petliak N.[1], Salem A.-B. M.[2]**
[1]Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
[2] Ain Shams University, Cairo, Egypt

**Abstract**. This paper addresses the problem of improving access protection in information systems by means of two-factor authentication. The study was aimed at developing a user authentication method based on one-time password generation in order to enhance the security and reliability of access control. In the proposed approach, the one-time password was generated not only from a static secret or a time-dependent value, but through hash-driven selection and parameterization of a trigonometric function. The parameters of the selected function were derived from a hash value computed from the user login, password, current system time, and an additional secret string using the SHA-256 algorithm. Such an approach made it possible to generate a dynamic one-time password for each authentication session. Based on the described procedure, a model of two-factor authentication was constructed in which the generated password served as an additional verification element complementing the user's permanent credentials. The proposed method and model can be used in client-server information systems and software-based authentication solutions employing a mobile device as the second authentication factor.

**Keywords**: Two-Factor Authentication, One-Time Password, Information Security, User Authentication, SHA-256, Hash Function, Client-Server System, Mobile Application.

**Introduction**. One-time passwords (OTPs) are generated for a single access session to an information system using software- or hardware-based security mechanisms. Their resilience is primarily determined by a limited validity period. As a result, intercepting a generated one-time password does not usually lead to a critical security breach, since it can be used only once. It remains valid for only a short period. Various software approaches may be employed to generate one-time passwords [1, 2].

In general, OTPs fall into the category of authentication based on possession, since the user must have access to a particular object or medium, such as a mobile phone or a predefined list of passwords. To enhance the robustness of OTP-based authentication, cryptographic algorithms are typically applied. In this context, authentication data serves as the user's secret key and is protected by an encryption mechanism. The secret key is stored on the server for a defined period and becomes available to the client after successful initialization in the information system. Once the password validity period expires, a new one is generated. In information systems, one-time passwords are often combined with conventional stored passwords to implement two-factor authentication [3, 4].

In such a scheme, the user first submits standard credentials, which are then verified by the authentication server. After successful verification, the server generates a one-time code and transmits it to the user's device. The user subsequently enters this code, after which the server compares the received value with the generated one (Fig.1). If the verification is successful, the authentication procedure is completed [3, 5-7].

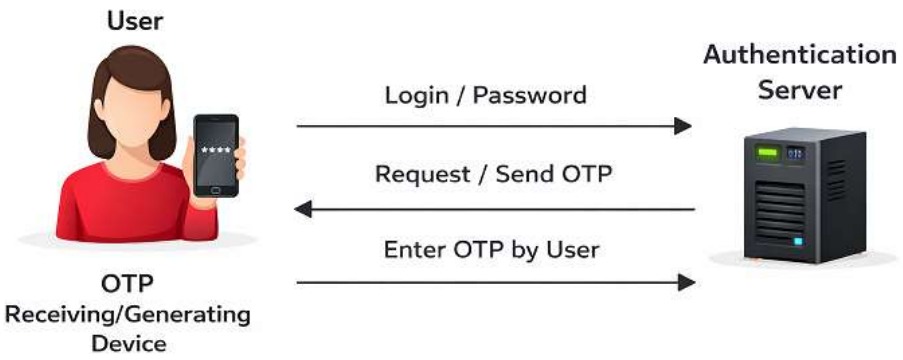



Fig. 1. Scheme of two-factor authentication using OTP

The principal sources of one-time passwords used in information systems include software tokens, randomly generated codes transmitted via channels such as SMS, and pre-generated password lists or scratch cards. Among these approaches, software tokens are the most widespread, as they are widely adopted and incur minimal additional costs [3, 8-10].

**The purpose of the work** is to develop an algorithm for two-factor user authentication based on one-time password generation to enhance the security and reliability of access control in information systems.

**Formulation of the problem**. Analysis of modern approaches to user authentication shows that traditional single-factor authentication based solely on a login and password does not ensure an adequate level of information security in distributed information systems. This is due to the risk of credential interception, unauthorized reuse, and insufficient resistance to external attacks [11-13]. Therefore, the problem arises of developing and studying an algorithm for two-factor authentication based on one-time password generation that ensures a higher level of protection and reliability of user access control.

**Solving the problem**. In the developed approach, the one-time password is not generated solely from a static secret or a time value. However, it is obtained through a hash-driven selection and parametrization of a trigonometric function. Such an approach allows the second authentication factor to be formed dynamically for each authentication session.

The generated one-time password may be represented as:

$$P_{OTP} = S(L,P), \tag{1}$$

where $P_{OTP}$ is the resulting one-time password, and $S(L,P)$ is the OTP generation function defined by the user login $L$ and password $P$. In the proposed method, this function is selected from a predefined matrix of trigonometric functions:

$$S(L,P) = T[i,j](\theta), \tag{2}$$

where $T[i,j]$ is the array of functions for calculating OTP, the parameters $\theta=(\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_n)$ are used to calculate the numerical value of the function.

To ensure dynamic OTP generation, the indices of the selected function and its parameters are derived from a hash value:

$$H = F(L,P,t,w), \tag{3}$$

where $F$ is a hash function, $t$ is the current system time, and $w$ is an additional secret string. In the developed implementation, the SHA-256 algorithm is used. Thus, each authentication session produces a new set of function parameters and, consequently, a new one-time password.

After the function value is computed, the resulting numeric value is converted to a fixed-length code that serves as the one-time password. In this way, the proposed method defines a deterministic, yet time-dependent, OTP generation procedure, in which the authentication code is generated via hash-based selection and parameterisation of a trigonometric function. This method can be implemented in software-based authentication systems using a mobile device as the second authentication factor.

To extend the proposed OTP generation algorithm, generators of secret words and trigonometric functions were developed. The secret word was generated automatically from uppercase and lowercase Latin characters, while the trigonometric function generator formed variable expressions with randomly selected parameters and arithmetic operators. Such an approach increased the variability of the input data and reduced the predictability of the resulting one-time password.

Based on the described OTP generation procedure, a two-factor authentication model was constructed (Fig.2). In this model, the generated one-time password serves as an additional verification element, complementing the user's permanent credentials. Such integration enabled extending the proposed generation method from a computational procedure to a complete two-factor authentication framework applicable to client-server information systems.

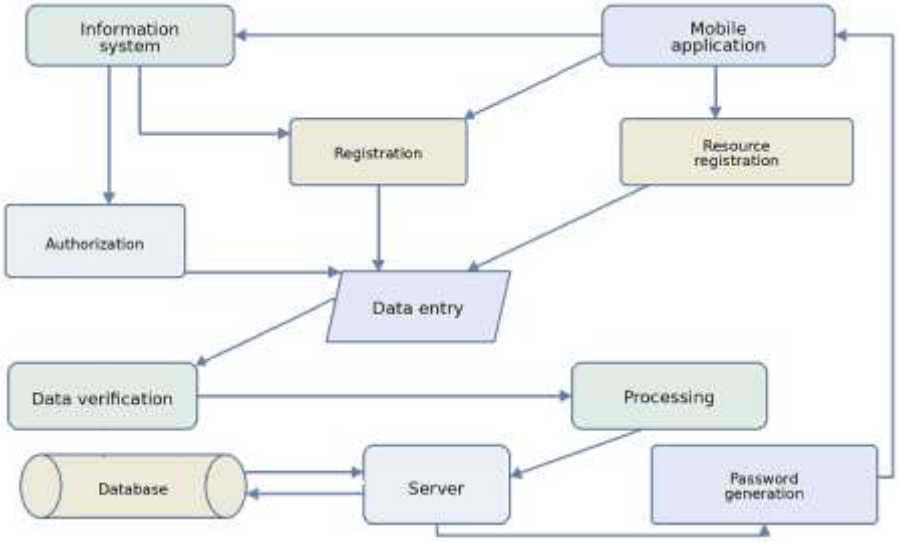



Fig. 2. The model of two-factor authentication

**Conclusion**. A method and a model for two-factor user authentication based on one-time password generation were developed to improve information system security. The proposed method was based on the hash-driven selection and parametrization of a trigonometric function using the SHA-256 algorithm. On this basis, a two-factor authentication model was constructed, with the generated one-time password serving as an additional verification factor. The obtained results showed that the proposed approach could be applied to strengthen access protection in client-server information systems.

## References

1. M'Raihi, D., Bellare, M., Hoornaert, F., Naccache, D., Ranen, O.: HOTP: An HMAC-Based One-Time Password Algorithm. RFC 4226, IETF, (2005).
2. M'Raihi, D., Machani, S., Pei, M., Rydell, J.: TOTP: Time-Based One-Time Password Algorithm. RFC 6238, IETF, (2011).
3. National Institute of Standards and Technology: Digital Identity Guidelines: Authentication and Authenticator Management. NIST Special Publication 800-63B-4, NIST, (2025).
4. Syahreen, M., Hafizah, N., Maarop, N., Maslinan, M.: A Systematic Review on Multi-Factor Authentication Framework. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 15(5), pp. 1043–1050, (2024).
5. Aloul, F.A., Zahidi, S., El-Hajj, W.: Two Factor Authentication Using Mobile Phones. In Proceedings of the 2009 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, IEEE, (2009).
6. Bonneau, J., Herley, C., van Oorschot, P.C., Stajano, F.: The Quest to Replace Passwords: A Framework for Comparative Evaluation of Web Authentication Schemes. In Proceedings of the 2012 IEEE Symposium on Security and Privacy, pp. 553-567, IEEE, (2012).
7. Hasan, S.S.U., et al.: A Review on Secure Authentication Mechanisms for Mobile Devices. Sensors, 25(3), Article 700, (2025).
8. M'Raihi, D., Machani, S., Pei, M., Rydell, J.: OCRA: OATH Challenge-Response Algorithm. RFC 6287, IETF, (2011).
9. de Jong, C.: Online Authentication Methods. Radboud University Nijmegen, 32 p., (2008).
10. Tran-Truong, P.T., Pham, M.Q., Son, H.X., et al.: A systematic review of multi-factor authentication in digital payment systems: NIST standards alignment and industry implementation analysis. Journal of Systems Architecture, 162, Article 103402, (2025).
11. Matzen, A., et al.: Challenges and Potential Improvements for Passkey Adoption – A Literature Review with a User-Centric Perspective. Applied Sciences, 15(8), Article 4414, (2025).
12. Oduguwa, T., Arabo, A.: Passwordless Authentication Using a Combination of Cryptographic, Steganographic and Biometrics. Computers, 4(2), Article 14, (2024).
13. Liu, Y.: Analysis of Multi-factor Authentication (MFA) Schemes in Zero Trust Architecture (ZTA): Current State, Challenges, and Future Trends. International Journal of Computer Applications, 186(57), pp. 30-37, (2024).

# A TEMPORAL KNOWLEDGE GRAPH FOR EXPLOIT PREDICTION FROM NVD AND CISA KEV

**Yerokhin A., Babii A.**
National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Abstract**. Software vulnerabilities exploitation prediction is an important topic in the field of proactive cybersecurity. Existing approaches usually rely on static vulnerability features such as scores received with different methods and text descriptions. One of the most well-known is the Exploit Prediction Scoring System (EPSS). The authors proposed to use a temporal knowledge graph to store structural and temporal relationships between entities (for example, vulnerabilities and affected products). To estimate the exploitation timeframe, we propose to implement prediction as a temporal knowledge graph link prediction task and introduce a novel dataset constructed by integrating the National Vulnerability Database (NVD) and the CISA Known Exploited Vulnerabilities (KEV) catalog, and fusion with other datasets such as ExploitDB, and the SEPSES cybersecurity knowledge graph. The resulting temporal KG contains CVE, CWE, CPE, and vendor entities across 2016–2025.

**Keywords**: Temporal Knowledge Graph, Link Prediction, CVE, CISA KEV, Exploit Prediction, Temporal KG Embeddings

**Introduction**. It is generally accepted that the number of software vulnerabilities disclosed to the public has increased substantially in recent years. The National Vulnerability Database (NVD) contains over 349 thousand CVE entries [1]. Some subset of these vulnerabilities with different levels of risk is actively used by attackers, as confirmed by the CISA Known Exploited Vulnerabilities (KEV) catalog. It lists more than 1,500 vulnerabilities observed in real-world attacks [2]. Precision identification of vulnerabilities that are likely to be targeted as exploits is increasingly becoming a vital factor in the work of security operations teams, including selecting the priority for patching and fixes. In the classical approaches, the binary classification task over static vulnerability features is used for exploit prediction. For example, the well-known EPSS [3] applies statistical learning methods trained on NVD data, including CVSS metrics and Common Platform Enumeration (CPE) information, to estimate exploitation probability scores.

Knowledge graphs (KGs) offer a natural representation for the structural relationships between vulnerabilities, weaknesses, affected products, and vendors. Recent work has demonstrated the importance of KG-based link prediction for vulnerability analysis [4, 5], constructing graphs over CVE and CPE entities and applying machine learning methods to predict missing associations.

A recent review of the literature on this topic found that in 2025, Liu et al. [6] presented a pipeline for constructing a dynamic vulnerability knowledge graph from heterogeneous sources. The authors address the fragmentation of cybersecurity data across structured databases (NVD, CNVD) and unstructured sources (security blogs, threat reports) by proposing a five-stage system based on multi-source data collection, ontology alignment, and large language model reasoning.

As a result of the research, they construct a graph of 5,416 entities (4,003 CVE, 891 CWE, 522 CAPEC) extracted from a static snapshot of NVD and CNVD (China National Vulnerability Database), supplemented by crawled reports, with no timestamps attached to triples and a random 70/20/10 split.

However, these approaches model the KG as a static snapshot, discarding the temporal dimension entirely, but vulnerability ecosystems are inherently dynamic.

**The purpose of the work** is to develop a temporal knowledge graph (TKG) that extends static KGs with timestamps, enabling the ability to reason about how relationships evolve over time.

**Formulation of the problem**. Develop a temporal knowledge graph (TKG) which extends the static KG by associating each fact with a timestamp $\tau$ yielding quadruples $(h, r, t, \tau)$ for the implementation of prediction whether the triple ($CVE_x$, {exploited_in_wild},{kev:marker}) will appear at a future timestamp $\tau_i$ given the graph state before the event.

**Solving the problem**. The first step in constructing a temporal KG dataset for exploit prediction is the integration of NVD data. It could be obtained from the NVD API, which has

restrictions, or from the community GitHub mirror of data feeds [7]. The NVD contains CVE entries with structured metadata including CVSS severity scores, CWE weakness mappings, and CPE product configurations.

This data will serve as the primary data source for the structural edges in our KG. CWE is a hierarchical taxonomy of software and hardware weakness types. Each CVE in NVD is mapped to one or more CWEs. This hierarchy provides parent-child and precede-follow relations. CPE is a structured naming scheme for software applications, operating systems, and hardware devices. It specifies which product versions are affected, enabling affected edges.

The second step is to add information about which active exploitation in the wild has been confirmed. For this step, we will use the CISA KEV catalog, which lists exploited CVEs and includes a *dateAdded* field recording when exploitation was confirmed. It uses an operationally validated timestamp. In the task of prediction, the KEV timestamp serves as the ground truth label source - a CVE exploitation example class. At the current moment, KEV contains about 1500 vulnerabilities, representing a very small amount (0.5-1%) of all NVD CVEs. This will cause a severe class imbalance that should be addressed when applying machine learning methods and evaluation.

The third step is fusion with ExploitDB [8] and SEPSES-CSKG [9]. SEPSES is KG that integrates and links critical information about vulnerabilities from various sources, and ExpolitDB is a public archive of exploit code and proof-of-concept (PoC) demonstrations, each mapped to one or more CVE identifiers with a publication date. ExploitDB entries contribute *has_public_exploit* edges to the temporal KG, capturing the intermediate event between CVE disclosure and confirmed exploitation. The characteristics of the knowledge graph are listed in Table 1:

Table 1

**Temporal knowledge graph for exploit prediction characteristics**

| **Characteristic** | **Count** |
|---|---|
| CVE nodes | 167,640 |
| Product nodes | 16,074 |
| CWE nodes | 699 |
| AFFECTS(Relation) | 463,670 |
| HAS_WEAKNESS (Relation) | 173,150 |
| CHILD_OF (Relation) | 774 |
| Total relations | 637,594 |
| Total nodes | 184,413 |
| KEV timestamps | 1,590 |

The main difference from the recently published dynamic vulnerability knowledge graph [6] is the dataset's scale and temporal scope. Liu et al. construct a graph of 5,416 entities extracted from a static snapshot and supplemented with crawled reports, without the temporal component of the knowledge graph, and use a random 70/20/10 split during the experiments.

The temporal CVE KG proposed here contains 184,413 entities with 636,820 non-static triples carrying an NVD publication timestamp spanning January 2021 to May 2026, and a train/validation/test partition at 01-Jan-2023 and 01-Jan-2024.

The temporal design encodes the causal ordering of disclosures and enables the evaluation of predictive models under realistic deployment conditions.

For the KEV prediction task, this dataset could be characterized by extreme class imbalance: 1,347 positive examples against 166,293 negatives, yielding a positive rate of approximately 0.80%. This ratio could be explained by real-world conditions, as most published vulnerabilities are never weaponized. Classification metrics such as accuracy become misleading under this imbalance. Precision-Recall AUC and the $F_1$ score are more informative, since they are sensitive to performance on the positive class specifically.

**Conclusion**. This paper presents a new temporal KG dataset for vulnerability exploitation prediction using a link prediction approach. It was constructed from three data sources: the National

Vulnerability Database as the primary CVE knowledge base, the CISA Known Exploited Vulnerabilities catalog as timestamped ground-truth exploitation labels, and ExploitDB as a source of public exploit release events.

The importance of the research related to the description of a temporal KG benchmark designed specifically for the task of exploitation prediction, framing CISA KEV additions as link prediction targets within a growing knowledge graph. The construction methodology addresses several practical challenges specific to cybersecurity data: severe class imbalance (fewer than 1% of CVEs are ever confirmed exploited), the risk of temporal data leakage when exploitation labels predate model training cutoffs, and the need for version-agnostic product normalization across heterogeneous CPE strings.

As a next step, we plan to evaluate a suite of temporal knowledge graph embedding methods on this benchmark, including HyTE [10], DE-SimplE [11], RE-NET [12], and EvolveGCN [13], alongside static baselines and the feature-based EPSS score as an industry reference. The central research question is whether graph structure and temporal propagation captured by embeddings provide the ability to predict vulnerability scores.

## References


1. National Institute of Standards and Technology. National Vulnerability Database (NVD) [Electronic resource]. URL: https://nvd.nist.gov/general/nvd-dashboard (accessed: 01.05.2025).
2. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. Known Exploited Vulnerabilities Catalog [Electronic resource]. URL: https://www.cisa.gov/resources-tools/resources/kev-catalog (accessed: 01.05.2025).
3. Jacobs J., Romanosky S., Edwards B., Adjerid I., Roytman M. Exploit Prediction Scoring System (EPSS). Digital Threats: Research and Practice. 2021. Vol. 2, No. 3. Art. 20. P. 1–17. DOI: 10.1145/3436242.
4. Shi Z., Matyunin N., Graffi K., Starobinski D. Uncovering CWE-CVE-CPE Relations with Threat Knowledge Graphs. ACM Transactions on Privacy and Security. 2024. Vol. 27, No. 1. Art. 13. P. 1–26. DOI: 10.1145/3641819.
5. Alfasi D., Shapira T., Bremler-Barr A. VulnScopper: Unveiling Hidden Links Between Unseen Security Entities. Proceedings of the 3rd Workshop on Graph Neural Networking (GNNet). ACM, 2024. P. 33–40. DOI: 10.1145/3694811.3697819.
6. Liu R. Dynamic Vulnerability Knowledge Graph Construction via Multi-Source Data Fusion and Large Language Model Reasoning / R. Liu, Y. Xie, Z. Dang, J. Hao, X. Quan, Y. Xiao, C. Peng // Electronics. 2025. Vol. 14, No. 12. Art. 2334. DOI:10.3390/electronics14122334.
7. Community reconstruction of the deprecated JSON NVD Data Feeds. [Electronic resource]. URL: https://github.com/fkie-cad/nvd-json-data-feeds (accessed: 08.05.2025)
8. Exploit-DB. (2026). Offensive Security's Exploit Database Archive. [Electronic resource]. URL: https://www.exploit-db.com/ (accessed: 08.05.2025)
9. Kiesling E., Ekelhart A., Kurniawan K., Ekaputra F. J. The SEPSES Knowledge Graph: An Integrated Resource for Cybersecurity. The Semantic Web – ISWC 2019 : 18th International Semantic Web Conference, Proceedings, Part II. Springer, 2019. Vol. 11779. P. 198–214. DOI: 10.1007/978-3-030-30796-7_13.
10. Dasgupta S. S. HyTE: Hyperplane-based Temporally aware Knowledge Graph Embedding / S. S. Dasgupta, S. N. Ray, P. P. Talukdar // Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Brussels: Association for Computational Linguistics, 2018. P. 2001–2011.
11. Goel R. Diachronic Embedding for Temporal Knowledge Graph Completion / R. Goel, S. M. Kazemi, M. Brubaker, P. Poupart // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34, No. 04. P. 3988–3995.
12. Jin W. Recurrent Event Network: Autoregressive Structure Inference over Temporal Knowledge Graphs / W. Jin, M. Qu, X. Jin, X. Ren // Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. – 2020. – P. 6669–6683.
13. Pareja A. EvolveGCN: Evolving Graph Convolutional Networks for Dynamic Graphs / A. Pareja, G. Domeniconi, J. Chen, T. Ma, T. Suzumura, H. Kanezashi, T. Kaler, T. Schlag, D. Narayanan // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. Vol. 34, No. 05. P. 5363–5370.

# INFORMATION SECURITY ASSESSMENT OF RAILWAY INTERLOCKING SYSTEMS USING A DEDICATED CYBER-POLYGON

**Yevdokymov S.**
Kherson State University, Kherson, Ukraine

**Abstract**. The paper presents a comprehensive security analysis of railway interlocking systems within a simulated cyber-polygon environment based on the Railtopo virtual model. As modern railway automation transitions toward standard network protocols and COTS components, the risk of cyber-induced "unsafe states" significantly increases. This study focuses on identifying critical software vulnerabilities in the ETCS On-board Unit (OBU) controller, a key component responsible for packet parsing and command validation. By employing low-level binary analysis and reverse engineering techniques using Ghidra and IDA Pro, the research bypasses the limitations of high-level traffic monitoring to detect hidden memory corruption bugs.

The systematic audit of the OBU software identified 363 potential vulnerabilities, including buffer overflows (CWE-125) and integer overflows (CWE-190). Experimental verification on the cyber range confirmed that these defects can be exploited to execute Denial of Service (DoS) and Remote Code Execution (RCE) attacks. Specifically, the study demonstrates an exponential correlation between network traffic intensity and system failure probability, with an 85% chance of transitioning to an "unsafe state" at 1000 pps. The findings justify the mandatory integration of automated protection methods and argument sanitization to ensure the functional safety of critical railway infrastructure.

**Keywords**: Railway Interlocking, Cybersecurity, Cyber-polygon, Buffer Overflow, RCE, DoS, ETCS OBU, Vulnerability Analysis.

**Introduction**. Modern railway automation and telemechanics systems are increasingly integrated into broader digital networks, thereby introducing new attack vectors for malicious actors. The most critical components are interlocking systems, which ensure traffic safety by performing logical control over the states of switches and signals.

**The purpose of the work**. The objective of this study is to evaluate the information security of railway interlocking systems by establishing a dedicated cyber-polygon for the identification of software vulnerabilities and the experimental verification of attack vectors that could compromise the safety of train operations.

**Formulation of the problem**. Modern railway automation is transitioning toward standard network protocols and commercial off-the-shelf (COTS) components, which introduces vulnerabilities common to general IT systems into critical infrastructure. The primary challenges addressed in this study include:

1. The lack of public, standardized methodologies for security testing of proprietary railway signaling software.
2. The critical need for deep binary analysis of closed-source modules (such as the ETCS On-board Unit (OBU) controller) to detect memory corruption bugs.
3. The high risk of cyber-induced "unsafe states," where the exploitation of software defects allows unauthorized manipulation of signals and track switches, bypassing traditional interlocking logic.

**Solving the problem**. To address the research objectives, the Railtopo virtual model was integrated, enabling the creation of an isolated cyber range. This approach provided the capability to conduct destructive testing and to analyze the response of interlocking logic to attacks (DoS, RCE) in real time without posing any risk to actual infrastructure assets.

A critical stage of the study was a comprehensive security audit of the software components, with a particular focus on the onboard ETCS controller (OBU controller). Unlike conventional security assessments based on high-level traffic monitoring, this work employed low-level binary analysis and reverse engineering using tools such as Ghidra and IDA Pro [1–3]. This assembly-level approach enabled the identification of hidden defects that are not detectable by standard intrusion detection systems (IDS) [4]. The results of a comparative analysis of five functional modules in terms of their vulnerability are presented in Table 1.

Table 1

**Comparative analysis of projects by potential attacks and vulnerabilities**

| No. | Project Name | Size (asm / exe) | Likely Vulnerabilities | Attack Vectors |
|---|---|---|---|---|
| 1 | ETCS OBU Controller | 95,7 KB / 7,93 MB | Buffer overflows, integer overflow (CWE-190), potential for ROP/JOP exploitation | Packet injection with excessive length fields, RCE, DoS via resource exhaustion |
| 2 | digital_rail simulation.asm | 95,7 KB / 7,88 MB | State machine logic flaws, risk of buffer overflows | Manipulation of loaded modules, logical command injection |
| 3 | ts2.asm | 95,7 KB / 7,93 MB | Out-of-bounds indexed access, fixed-size buffers | Parsing logic errors, internal pointer manipulation |
| 4 | interlocking_console.asm | 95,7 KB / 22,65 MB | Race conditions, multithreading issues, complex state inconsistencies | Relay logic manipulation, inconsistent traffic control states |
| 5 | EdgwareRoadSignalCabin.asm | 95,7 KB / 7,89 MB | Unchecked memory access, lack of external input validation | Protocol fuzzing, railway signal state manipulation |

As indicated by the data in Table 1, the substantial increase in the executable file size for the interlocking_console.asm project (22.65 MB) is attributed to the integration of advanced multi-threading support mechanisms and the processing of complex logical states within the relay automation. The most critical security metrics were observed in the ETCS On-board Unit (OBU) controller. Static analysis identified 363 potential defects within this module, 10 of which were fully confirmed as critical vulnerabilities during the verification phase.

Specifically, a detailed audit of the packet processing logic allowed for the localization of a critical vulnerability at address 0x140001820. Assembly code analysis confirmed a systematic lack of bounds checking during pointer manipulations in the rcx register. It was established that the program trusts the length value retrieved from the network packet and utilizes it for memory write operations without proper validation. This oversight facilitates the construction of Return-Oriented Programming (ROP) chains via indirect jump gadgets (e.g., jmp rcx), potentially leading to Remote Code Execution (RCE). Furthermore, the exploitation of an integer overflow (CWE-190) within the same module enables a Denial of Service (DoS) state, completely obstructing the interlocking service and rendering the system uncontrollable.

**Results and Discussion.** The experimental phase of the study enabled a quantitative assessment of the ETCS OBU controller's resilience under simulated network stress. As illustrated in Fig. 1, an exponential correlation was confirmed between the intensity of the fuzzing traffic and the probability of system failure. Specifically, upon exceeding the threshold of 500 packets per second (pps), an integer overflow (CWE-190) within the packet analyzer leads to critical resource exhaustion of the controller or a complete process hang, effectively paralyzing the interlocking logic.

The observed increase in memory corruption incidents, specifically the buffer overflow at address 0x140001820, confirms the critical instability of the system in the absence of specialized protection. Notably, at a traffic intensity of 1000 pps, the probability of an "unsafe state" occurring (e.g., unauthorized signal changes or track switch transitions) reached 85%. These results emphasize that the identified binary defects pose a direct threat to the functional safety of railway infrastructure, allowing an attacker to manipulate traffic logic in real-time.

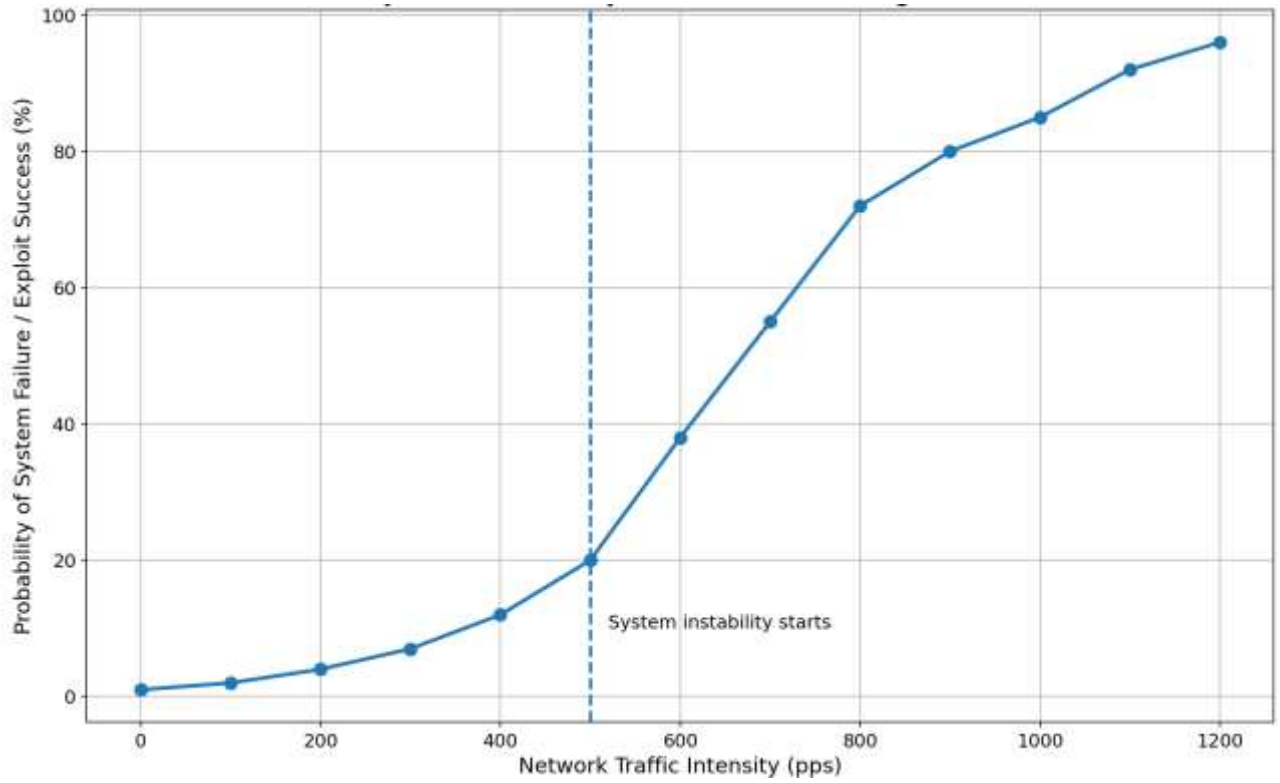



Fig. 1. Dependence of system failure probability on network traffic intensity

**Conclusion**. The results of the simulation modeling confirmed that the lack of input validation mechanisms in specialized interlocking modules creates critical conditions for software vulnerabilities within railway automation systems. The developed cyber-polygon demonstrated high efficiency as a tool for the objective verification of security measures and the analysis of anomalous network activity in an isolated environment.

The proven increase in the probability of the system transitioning into an uncontrollable state during the exploitation of binary defects justifies the necessity of integrating automated protection methods and mandatory argument sanitization in the software of critical infrastructure objects. Implementing the proposed approaches will minimize the risks of unauthorized manipulation of traffic logic and enhance the overall level of functional safety in the railway industry.

## References

1. Ahmad R., Al-Zahrani A. S., Al-Shehri S., Al-Ghamdi A. S. Cybersecurity in Railway Signaling Systems: A Review // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 12345–12360. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3241567.
2. Xu S., Wang Y. Defending against Return-Oriented Programming attacks based on return instruction using static analysis and binary patch techniques // Science of Computer Programming. 2022. Vol. 216. Art. 102768. – DOI: 10.1016/j.scico.2022.102768.
3. Bindra S. S., Aggarwal A. Security in cyber physical systems: Transformation and challenges // Journal of Autonomous Intelligence. 2024. Vol. 7, Iss. 4. Art. 1336. DOI: 10.32629/jai.v7i4.1336.
4. NIST. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security (SP 800-82 Rev. 3). 2024. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r3.pdf

# УРАЗЛИВІСТЬ МАСОВОГО ПРИСВОЄННЯ В REST API НА ОСНОВІ SPRING BOOT: АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ТА МЕТОДІВ ЗАХИСТУ

**Солдо Б.[1], Беркунський О.Є.[2], Книрік Н.Р.[2], Беркунський Є.Ю.[2]**
[1]University North, Koprivnica, Croatia,
[2]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

**Анотація**. В матеріалах роботи розглядається проблема масового присвоєння (Mass Assignment) в REST API, розроблених на основі Spring Boot. Масове присвоєння виникає через автоматичне зв'язування параметрів HTTP запитів із внутрішніми полями Java моделей, що може призвести до несанкціонованої модифікації даних, ескалації привілеїв або порушення цілісності системи. Особлива увага приділяється механізмам десеріалізації Jackson та автоматичному прив'язуванню даних у Spring MVC, які за замовчуванням обробляють всі доступні поля, якщо розробник не вказує обмеження. Аналізуються типові сценарії атак, зокрема зміна службових полів шляхом передачі додаткових параметрів у POST запиті. Розглянуто рекомендації стандарту OWASP щодо запобігання цій уразливості, а також сучасні підходи до захисту, включаючи використання DTO об'єктів, явне визначення дозволених полів, застосування анотацій для контролю доступу та впровадження кастомних механізмів валідації. Наведено практичні приклади та запропоновано вдосконалення безпеки REST API, що дозволить розробникам створювати більш захищені та стійкі до атак веб системи.

**Ключові слова**: масове присвоєння, HTTP, Spring Boot, Java, Kotlin, REST API, безпека, десеріалізація, OWASP.

# BULK ASSIGNMENT VULNERABILITY IN SPRING BOOT-BASED REST API: ANALYSIS OF PROTECTION MECHANISMS AND METHODS

**Božo Soldo[1], Berkunskyi O.[2], Knyrik N.[2], Berkunskyi Ye.[2]**
[1]University North, Koprivnica, Croatia,
[2]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

**Abstract**. The materials of the paper consider the problem of Mass Assignment in REST APIs developed based on Spring Boot. Bulk assignments occur due to the automatic binding of HTTP request parameters to the internal fields of Java models, which can lead to unauthorized data modification, privilege escalation, or system integrity violation. Attention is paid to the Jackson deserialization mechanisms and automatic data binding in Spring MVC, which by default handle all available fields unless the developer specifies a limit. Typical attack scenarios are analyzed, in particular, changing service fields by passing additional parameters in a POST request. The recommendations of the OWASP standard to prevent this vulnerability are considered, as well as modern approaches to protection, including the use of DTO objects, explicit definition of allowed fields, the use of annotations for access control, and the implementation of custom validation mechanisms. Practical examples are given, and improvements to the security of REST APIs are proposed, which will allow developers to create more secure and resistant to web attacks.

**Keywords**: bulk assignment, HTTP, Spring Boot, Java, Kotlin, REST API, security, deserialization, OWASP.

**Вступ**. Сучасні веб-фреймворки, зокрема Spring Boot, широко застосовують механізми автоматичного зв'язування параметрів HTTP-запитів із внутрішніми структурами даних. Такий підхід значно спрощує розробку мікросервісів на основі REST API, однак створює потенційні вразливості, якщо розробник не обмежує доступ до службових або внутрішніх полів моделі[1]. Однією з таких вразливостей є масове присвоєння (Mass Assignment), також відоме як autobinding vulnerability або object injection. Згідно з рекомендаціями OWASP, масове присвоєння виникає тоді, коли зловмисник може передати додаткові параметри в запиті, які автоматично будуть прив'язані до внутрішніх полів об'єкта, що не передбачені API-специфікацією. Це може призвести до несанкціонованої модифікації даних, ескалації привілеїв або порушення цілісності системи.

**Мета роботи**. Метою роботи є аналіз вразливості масового присвоєння в REST API, які розроблено мовами Java та Kotlin із застосуванням фреймворку Spring Boot та дослідження механізмів виникнення такої вразливості на рівні десеріалізації та автозв'язування даних. Дослідження спрямоване на розробку практичних рекомендацій і сучасних методів захисту, які дозволять розробникам Java-застосунків підвищити рівень безпеки вебсистем, зменшити ризики несанкціонованої модифікації даних через забезпечення відповідності стандартам OWASP.

**Постановка задачі**. Відомо [3], що у Spring Boot автоматичне зв'язування реалізується за допомогою DataBinder та бібліотеки Jackson, яка десеріалізує JSON-об'єкти у Java-класи. Якщо модель містить поля, що не повинні змінюватися користувачем (наприклад, status, role, isAdmin, createdAt), але не мають обмежень на запис, зловмисник може передати їх у тілі запиту. У Java-екосистемі ця проблема посилюється тим, що при використанні бібліотеки Jackson за замовчуванням десеріалізуються всі доступні поля, фреймворк Spring MVC автоматично прив'язує всі параметри, якщо розробник не вказав обмеження, моделі даних часто містять службові поля, які не призначені для зовнішньої модифікації.

**Вирішення проблеми**. Розглянемо механізм виникнення вразливості у Spring Boot. Припустімо, що JSON-об'єкт user, отриманий у межах HTTP-запиту, відображається на таблицю users у базі даних. Ця таблиця містить булевий стовпець is_admin, призначений виключно для читання, а також три змінювані стовпці – username, password та email. За відсутності належної конфігурації REST-фреймворк може автоматично зіставити додатковий атрибут isAdmin, переданий у запиті на створення користувача, з відповідним стовпцем is_admin у таблиці users. У такому разі зловмисник може модифікувати тіло запиту операції POST /users, додавши атрибут isAdmin, який не передбачений специфікацією. Фреймворк автоматично інтерпретує цей атрибут як такий, що відповідає стовпцю is_admin, що фактично дає змогу перезаписати легітимне значення у базі даних довільним значенням, переданим у HTTP-запиті.

Для запобігання масовому присвоюванню (mass assignment) розробникам слід виключати атрибути лише для читання зі списку тих, що можуть бути автоматично прив'язані до внутрішньої моделі даних API. Однак, проблема вразливості масового присвоювання може вже бути виявлена у процесі експлуатації розроблених застосунків. Тому, першим етапом вирішення цієї проблеми є аналіз структури API на збіг параметрів ендпоінтів (endpoints) для пар запитів GET, які отримують інформацію та POST, PUT або PATCH, що змінюють інформацію на сервері[2]. Для проведення такого аналізу пропонується використання засобу LightMass[3], що призначений для такої ідентифікації. Схему його роботи наведено на рисунку 1.




Рис. 1. Схема визначення вразливості масового присвоювання

Після визначення потенційних вразливостей масового присвоювання у застосунку, необхідно використати один із методів запобігання її. До таких методів можна віднести використання DTO (Data Transfer Objects) – тобто явно визначити поля які можуть бути змінені користувачем. Наприклад, для згаданого вище об'єкта user, відповідні доменний клас сутності та DTO показані на рисунку 2.

```java
public class User {
    private String userid;
    private String password;
    private String email;
    private boolean isAdmin; // службове поле
}
```

```java
public class UserCreateDTO {
    private String userid;
    private String password;
    private String email;
}
```

Рис. 2. Клас сутності для користувача та клас об’єкта для операції його створення

Стандартом OWASP рекомендовано створювати окремі моделі для доменної логіки (Entity), створення сутності (CreateDTO), оновлення (UpdateDTO) та читання (ResponceDTO).

До інших можливих рішень можна віднести обмеження полів через використання анотації @InitBinder, яка дозволяє реалізувати список дозволених для зміни полів (allow-list). Також можна використати анотацій бібліотеки серіалізації Jackson для ігнорування невідомих полів (@JsonIgnoreProperties) та заборони десереалізації конкретного поля (@JsonIgnore).

**Висновок**. У ході проведеного дослідження вразливості масового присвоєння було виявлено, що при створенні застосунків мовами Java та Kotlin із використанням фреймворку Spring Boot, вона є наслідком поєднання автоматичної десеріалізації Jackson та механізмів autobinding у Spring MVC. Попри зручність цих механізмів, їх використання без належних обмежень створює значні ризики безпеки. Запропоновані методи виявлення потенційно вразливих ендпоінтів та підходи до убезбечення застосунків – використання DTO, обмеження полів через @InitBinder, застосування анотацій Jackson та архітектурне розділення моделей – забезпечують ефективний захист від масового присвоєння та відповідають рекомендаціям OWASP.

**Список використаних джерел**


1. Jayalath, R. K., Ahmad, H., Goel, D., Syed, M. S., & Ullah, F. (2024). Microservice Vulnerability Analysis: A Literature Review with Empirical Insights. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.03960.
2. Piskachev, G., Becker, M. & Bodden, E. (2023). Can the configuration of static analyses make resolving security vulnerabilities more effective? – A user study. Empir Software Eng 28, 118. DOI: https://doi.org/10.1007/ s10664-023-10354-3.
3. Mazidi, A. (2024). *LightMass* [Computer software]. GitHub. https://github.com/arash-mazidi/LightMass.

# СИСТЕМАТИЧНИЙ ТА ЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ IOT-ПРИСТРОЇВ НА ПРИКЛАДІ DVR HIKVISION

**Воробкало Т.В., Івченко О.В., Гавриш О.С., Воробкало О.К.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** В роботі досліджено питання забезпечення безпеки IoT-пристроїв на прикладі мережевого відеореєстратора Hikvision DVR. Метою роботи є комплексний, систематичний та етичний аналіз безпеки DVR-пристрою з виявленням вразливостей і розробленням рекомендацій щодо підвищення рівня кіберзахисту IoT-пристроїв. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: аналіз архітектури та принципів функціонування пристрою; виявлення потенційних векторів атак; дослідження мережевих сервісів і портів; оцінка механізмів автентифікації та захисту даних. Об'єкт дослідження – IoT-пристрої класу DVR; предмет – їхні вразливості та механізми захисту інформації. У дослідженні використано методи пасивного та активного аналізу, включаючи етичне тестування безпеки (ethical hacking), мережеве сканування та аналіз трафіку із застосуванням спеціалізованих інструментів. У результаті встановлено наявність типових вразливостей, зокрема відкритих портів, використання застарілих протоколів, слабких механізмів автентифікації, потенційно вразливих версій прошивки та недоліків у шифруванні даних, а також запропоновано практичні рекомендації щодо їх усунення й підвищення рівня захисту. Результати можуть бути використані для підвищення безпеки IoT-систем.

**Ключові слова:** кібербезпека IoT-пристроїв, цифровий відеореєстратор DVR, етичний хакінг, вразливості, мережевий аналіз.

# SYSTEMATIC AND ETHICAL SECURITY ANALYSIS OF IOT DEVICES ON THE EXAMPLE OF HIKVISION DVR

**Vorobkalo T., Ivchenko O., Havrysh O., Vorobkalo O.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper investigates the security of IoT devices using the example of the Hikvision DVR network video recorder. The aim of the study is a comprehensive, systematic and ethical security analysis of the DVR device, identifying vulnerabilities and developing recommendations for improving the cybersecurity level of IoT devices. To achieve this goal, the following tasks were defined: analysis of the device architecture and operating principles, identification of potential attack vectors, examination of network services and ports, and evaluation of authentication mechanisms and data protection methods. The object of the study is IoT devices of the DVR class, while the subject is their vulnerabilities and information protection mechanisms. The research employs passive and active analysis methods, including ethical hacking, network scanning, and traffic analysis using specialized tools. As a result, typical vulnerabilities were identified, such as open ports, outdated protocols, weak authentication mechanisms, potentially vulnerable firmware versions, and deficiencies in data encryption. Practical recommendations for mitigating these issues and improving security levels were proposed. The results can be used to enhance the security of IoT systems.

**Keywords:** IoT cybersecurity, digital video recorder, ethical hacking, vulnerabilities, network analysis.

**Вступ.** Інтернет речей (IoT) є одним із ключових напрямів розвитку сучасних інформаційних технологій, що охоплює широкий спектр пристроїв – від побутових сенсорів до систем відеоспостереження [1]. Особливе місце серед них займають мережеві відеореєстратори (DVR), зокрема пристрої Hikvision DVR, які широко використовуються у приватному, комерційному та державному секторах. Разом із зростанням кількості підключених пристроїв підвищується і рівень кіберзагроз. Недостатній рівень захисту IoT-пристроїв може призводити до несанкціонованого доступу та витоку конфіденційної інформації. У зв'язку з цим актуальним є проведення систематичного аналізу безпеки таких пристроїв із дотриманням етичних норм [2].

**Мета роботи.** Комплексний, систематичний та етичний аналіз безпеки DVR-пристрою, що передбачає виявлення потенційних вразливостей у його архітектурі, мережевих сервісах і програмному забезпеченні, оцінювання ефективності механізмів автентифікації та захисту даних, а також розроблення обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення рівня кіберзахисту IoT-пристроїв у практичних умовах експлуатації.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити архітектуру та принцип роботи DVR, визначити потенційні вектори атак, провести аналіз мережевих сервісів і відкритих портів, перевірити наявність відомих вразливостей, оцінити механізми автентифікації та захисту даних, сформулювати рекомендації щодо підвищення рівня безпеки.

**Методологія дослідження** Дослідження проведено із застосуванням підходів етичного тестування безпеки (ethical hacking) та включає кілька етапів. На першому етапі здійснено пасивний аналіз, що передбачає збір інформації про пристрій без активного втручання в його роботу. Було проаналізовано документацію, мережеву поведінку та доступні інтерфейси. Другий етап включає активне тестування, зокрема сканування мережі для виявлення відкритих портів і сервісів. Для цього використано інструменти мережевого аналізу, такі як Nmap та Wireshark. На третьому етапі проводився аналіз прошивки пристрою з метою виявлення потенційних вразливостей у програмному забезпеченні. Усі дії виконано з дотриманням принципів відповідального розкриття вразливостей (responsible disclosure).

**Результати дослідження.** У ході проведеного аналізу було виявлено низку типових проблем безпеки, характерних для IoT-пристроїв даного класу. Зокрема, встановлено наявність відкритих мережевих портів, які можуть використовуватися для віддаленого доступу до пристрою. Деякі з цих сервісів працюють із використанням застарілих або недостатньо захищених протоколів. Також виявлено потенційні ризики, пов’язані з механізмами автентифікації. Використання стандартних або слабких паролів значно підвищує ймовірність компрометації пристрою. Аналіз показав, що окремі версії прошивки можуть містити відомі вразливості, які описані в публічних базах (CVE). Це створює додаткові ризики у випадку несвоєчасного оновлення програмного забезпечення. Окрім цього, виявлено можливі проблеми з шифруванням даних, що передаються мережею, що може призвести до їх перехоплення.

Проведення аналізу безпеки IoT-пристроїв пов’язане з потенційними ризиками порушення конфіденційності та цілісності інформаційних систем. У зв’язку з цим дослідження виконувалося з дотриманням таких принципів:

- тестування проводилося на власному обладнані Hikvision DS-7108HGHI-K1, як представнику поширеного на сьогодні сегмента DVR-пристроїв;
- не здійснювалося несанкціоноване втручання в сторонні системи;
- результати дослідження спрямовані на підвищення рівня безпеки, а не на експлуатацію вразливостей.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження було підтверджено, що IoT-пристрої, зокрема DVR Hikvision, мають ряд потенційних вразливостей, які можуть бути використані зловмисниками.

Запропонований систематичний підхід до аналізу безпеки дозволяє ефективно виявляти слабкі місця та формувати рекомендації щодо їх усунення. Основними заходами підвищення безпеки є регулярне оновлення прошивки, використання складних паролів, обмеження доступу до мережевих сервісів та сегментація мережі. Отримані результати можуть бути використані для підвищення рівня захисту IoT-пристроїв у практичних умовах.

**Список використаних джерел**

1. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape 2023. Heraklion: ENISA, 2023. URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2023.
2. Almazrouei O., Magalingam P., Hasan M. K., et al. Penetration Testing for IoT Security: The Case Study of a Wireless IP Security Camera. In: IEEE 2nd International Conference on AI in Cybersecurity (ICAIC). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/icaic57335.2023.10044176.

# МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ СТІЙКОСТІ ТА НЕПОМІТНОСТІ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ

**Ланських Є.В., Ланських О.Б., Наумов О. М.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У тезах розглянуто проблему адаптивного керування параметрами цифрового водяного знака в зображеннях за умов суперечності між стійкістю до атак та перцептивною непомітністю. Метою роботи є формування теоретичної моделі, яка поєднує локальні характеристики зображення з контекстом безпеки документа. Об'єктом дослідження є процес цифрового водяного маркування зображень, а предметом — методи нечіткого керування силою вбудовування з урахуванням ентропії контурів, яскравості фону та рівня конфіденційності. Використано методи системного аналізу, математичного моделювання, нечіткої логіки Мамдані, багатокритеріального оцінювання та порівняння метрик PSNR, SSIM, NC і BER. Запропоновано гібридну систему нечіткого висновку з трьома вхідними змінними та вихідним коефіцієнтом сили маркування. Результати імітаційного моделювання підтверджують, що модель здатна зміщувати компроміс між якістю та стійкістю залежно від адміністративного статусу документа: для конфіденційних матеріалів підвищується стійкість, а для публічних — зберігається максимальна непомітність.

**Ключові слова:** цифровий водяний знак, нечіткий висновок, стійкість, непомітність, ентропія контурів, конфіденційність документа.

# MODEL OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF ROBUSTNESS AND IMPERCEPTIBILITY PARAMETERS OF DIGITAL WATERMARKS BASED ON FUZZY INFERENCE

**Yevhen Lanskykh, Olena Lanskykh, Oleksii Naumov**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses adaptive control of digital watermark parameters in images under the inherent conflict between attack robustness and perceptual imperceptibility. The aim is to formulate a theoretical model that combines local image characteristics with the security context of a document. The object of the study is the process of digital image watermarking, while the subject is fuzzy control of embedding strength based on edge entropy, background luminance, and confidentiality level. The research uses system analysis, mathematical modeling, Mamdani fuzzy logic, multicriteria evaluation, and comparison of PSNR, SSIM, NC, and BER metrics. A hybrid fuzzy inference system with three input variables and one output embedding-strength coefficient is proposed. Simulation results confirm that the model dynamically shifts the trade-off between visual quality and robustness according to the administrative status of the document: confidential materials receive stronger protection, whereas public materials preserve maximum imperceptibility.

**Keywords:** digital watermark, fuzzy inference, robustness, imperceptibility, edge entropy, document confidentiality.

**Вступ.** Розвиток цифрових комунікацій спричинив різке зростання обсягів копіювання, передавання та повторного використання зображень без втрати їх початкової якості. У таких умовах цифрові водяні знаки розглядаються не лише як засіб підтвердження авторства, а й як компонент кібербезпеки, що забезпечує трасування джерела витоку, перевірку автентичності та контроль цілісності мультимедійних даних [1]. Водночас ефективність будь-якої системи маркування визначається здатністю підтримувати баланс між стійкістю водяного знака до атак і його непомітністю для візуальної системи людини [2].

**Постановка задачі.** Традиційні алгоритми часто використовують фіксований або глобальний коефіцієнт сили вбудовування. Такий підхід є обмеженим, оскільки однакове підсилення водяного знака по всьому зображенню не враховує локальну структуру

контейнера: у гладких ділянках воно породжує видимі артефакти, а в текстурованих областях може бути недостатнім для гарантованої стійкості. Наявні HVS-орієнтовані нечіткі моделі адаптують вбудовування до контурів, текстури або яскравості [3], однак переважно ігнорують адміністративний контекст документа. При цьому вимоги до маркування публічного рекламного зображення, службового медичного знімка та таємного корпоративного документа не можуть бути однаковими. Отже, задача полягає у формалізації моделі, яка одночасно враховує перцептивні характеристики зображення та рівень ризику витоку інформації, подібно до ризик-адаптивних підходів контролю доступу [4].

**Мета роботи.** Метою роботи є побудова теоретичної моделі адаптивного управління параметрами стійкості та непомітності цифрового водяного знака на основі системи нечіткого висновку. Для досягнення цієї мети необхідно визначити множину вхідних лінгвістичних змінних, побудувати базу правил, що узгоджує контентні та контекстні фактори, а також встановити зв'язок між вихідним коефіцієнтом сили маркування і метриками якості та стійкості.

**Основна частина.** Запропонована модель ґрунтується на системі нечіткого висновку типу Мамдані, що є доцільною для задач із розмитими межами між класами та потребою в пояснюваних рішеннях [5]. Вхідними змінними є рівень конфіденційності документа, локальна ентропія контурів і яскравість фону. Рівень конфіденційності надходить із підсистеми політик безпеки та описується термами «Публічний», «Службовий» і «Таємний». Ентропія контурів характеризує текстурну складність локального блоку, а яскравість фону враховує властивість зорової системи людини слабше реагувати на флуктуації у світлих областях [6].

Вихідною змінною системи є адаптивна сила маркування, яка масштабує енергію водяного знака під час його інтеграції у частотні коефіцієнти зображення. Для неї визначено впорядковану множину лінгвістичних рівнів, що охоплює стани від мінімального до максимального підсилення. Така градація дає змогу плавно переходити від майже непомітного вбудовування до агресивного захисту, стійкого до компресії JPEG, фільтрації, масштабування та обрізання.

База знань містить 27 правил, сформованих як добуток трьох термів конфіденційності, трьох термів ентропії та трьох термів яскравості. Її логіка поєднує два типи знань: психофізіологічні властивості HVS та політики інформаційної безпеки. Якщо документ є публічним, система надає пріоритет візуальній якості та обмежує силу вбудовування, особливо в темних і гладких ділянках. Для службового документа обирається компромісний режим. Для таємного документа правила зміщують рішення на користь стійкості, навіть якщо локальні умови маскування є несприятливими. Саме ця властивість відрізняє модель від класичних HVS-підходів, які не розрізняють адміністративний статус контейнера.

У практичній реалізації модель може застосовуватися як керуючий модуль між етапом попереднього аналізу контейнера та процедурою безпосереднього вбудовування водяного знака. На першому етапі зображення розбивається на локальні області, для яких оцінюються структурна насиченість, контрастність і умови маскування. На другому етапі з політики безпеки або метаданих документа зчитується контекстний рівень важливості. Після цього система нечіткого висновку формує локальний коефіцієнт сили вбудовування, який передається до частотного або гібридного алгоритму маркування. Така послідовність дозволяє відокремити політику прийняття рішення від конкретного способу вбудовування, тому запропонований підхід не прив'язаний до одного перетворення чи одного формату зображень.

Механізм висновку передбачає фазифікацію чітких вхідних параметрів, обчислення ступеня істинності активованих правил, агрегацію результатів і дефазифікацію методом центру ваги. Неперервні гауссові функції належності забезпечують відсутність різких стрибків коефіцієнта між сусідніми блоками, що зменшує ризик появи блочних артефактів. Водночас правило-орієнтована структура належить до класу пояснюваного штучного

інтелекту: кожне рішення щодо сили захисту можна простежити від значень вхідних параметрів до конкретного правила.

Імітаційне моделювання, виконане для тестових зображень Splash, Mandrill і Peppers, показало, що контекстне керування справді змінює положення компромісу між якістю та стійкістю. У режимі підвищеної конфіденційності модель зміщує рішення на користь надійнішого збереження водяного знака після типових спотворень, а в режимі публічного використання надає перевагу збереженню візуальної якості контейнера. Виявлена тенденція підтверджує, що запропонований контекстний параметр ефективно керує напрямом компромісу та дає змогу обґрунтовано змінювати пріоритети захисту. Порівняно з оптимізаційними методами, що можуть потребувати ітеративного пошуку [7], запропонована модель має перевагу у прозорості, пояснюваності та придатності до роботи в реальному часі.

Оцінювання результатів доцільно проводити за кількома групами показників. Метрики PSNR та SSIM описують ступінь збереження перцептивної якості, тоді як NC і BER характеризують відновлюваність водяного знака після впливу атак. Важливо, що в запропонованій моделі ці метрики не оптимізуються ізольовано: вони розглядаються як прояв єдиного компромісу, керованого контекстом документа. Такий підхід є корисним для систем, де безпекова політика має бути зрозумілою для адміністратора, а зміна режиму захисту повинна мати логічне пояснення.

**Висновки.** У роботі сформовано модель адаптивного управління параметрами цифрового водяного знака, яка інтегрує локальні властивості зображення та контекст безпеки документа. Основним результатом є база нечітких правил, що дозволяє змінювати силу вбудовування залежно від ентропії, яскравості та рівня конфіденційності. Модель зберігає пояснюваність, не потребує навчання на великих наборах даних і може бути застосована в DWT-SVD або IWT-SVD схемах маркування. Отримані результати доцільно трактувати як теоретичне обґрунтування напряму адаптації, а не як остаточне числове порівняння окремих режимів. Подальші дослідження варто спрямувати на програмну реалізацію моделі, розширення набору атак, експериментальну перевірку на кольорових зображеннях та інтеграцію з корпоративними DLP-системами.

## Список використаних джерел


1. Ланських Є., Наумов О. Сучасні методи цифрового водяного маркування зображень: класифікація, аналіз і тенденції розвитку. Information Technology and Society. 2025. Вип. 2 (17). С. 89–95. DOI: 10.32689/maup.it.2025.2.13.
2. Singh P., Devi K. J., Thakkar H. K. et al. Blind and secured adaptive digital image watermarking approach for high imperceptibility and robustness. Entropy. 2021. Vol. 23. Article 1650. DOI: 10.3390/e23121650.
3. Jamali M., Rafiei S., Soroushmehr S. M. R. et al. Adaptive blind image watermarking using fuzzy inference system based on human visual perception. arXiv preprint. 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1709.06536.
4. Cheng P.-C., Rohatgi P., Keser C., Karger P. A., Wagner G. M., Reninger A. S. Fuzzy multi-level security: An experiment on quantified risk-adaptive access control. IEEE Symposium on Security and Privacy (SP ’07). IEEE, 2007. P. 222–230. DOI: 10.1109/SP.2007.21.
5. Abuldaim A. M., Sabri R. I. QRD-Mamdani FIS for Digital Image Watermarking. International Journal of Computer Trends and Technology. 2019. Vol. 67, No. 7. P. 86. DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V67I7P114.
6. Oueslati S., Cherif A., Solaiman B. Maximizing strength of digital watermarks using fuzzy logic. Signal & Image Processing: An International Journal. 2010. Vol. 1, No. 2. P. 112–124. DOI: 10.5121/sipij.2010.1210.
7. Bhatia S., Almutairi A. A robust fuzzy equilibrium optimization-based ROI selection and DWT-based multi-watermarking model for medical images. Sustainability. 2023. Vol. 15, Iss. 7. Article 6189. DOI: 10.3390/su15076189.

# КІБЕРЗАГРОЗИ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ОБМІНУ ДАНИМИ РОЗУМНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ У SMART GRID-СЕРЕДОВИЩІ

**Магро В.І.[1], Прокопович-Ткаченко Д.І.[2,3,4], Черкаський Д.О.[1]**
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[2]Університет митної справи та фінансів, Дніпро, Україна
[3]Державна наукова установа «Інститут інформації, безпеки і права Національної академії правових наук України», Київ, Україна
[4]Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі систематизовано кіберзагрози, що виникають у каналах зв'язку між інтелектуальними лічильниками, концентраторами даних та диспетчерськими системами Advanced Metering Infrastructure. Розглянуто гетерогенні середовища передавання — GSM/GPRS, LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), Power Line Communication та IP-мережі — з акцентом на атаках підміни команд, несанкціонованого відключення абонентів, фальсифікації показників, replay-атаках, компрометації ключів і порушенні доступності сервісу. Запропоновано формалізовану модель поверхні атаки smart meter infrastructure як складової критичної інформаційної інфраструктури.

**Ключові слова:** smart grid, розумні лічильники, AMI, поверхня атаки, кіберзагрози, replay-атака, LPWAN.

# CYBER THREATS IN TELECOMMUNICATION DATA EXCHANGE CHANNELS OF SMART METERS IN A SMART GRID ENVIRONMENT

**Mahro V.I.[1], Prokopovych-Tkachenko D.I.[2,3,4], Cherkaskyi D.O.[1]**
[1]National Technical University "Dnipro University of Technology", Dnipro, Ukraine
[2]University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine
[3]State Scientific Institution "Institute of Information, Security and Law of the National Academy of Legal Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[4]State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper systematizes cyber threats arising in communication channels between smart meters, data concentrators, and Advanced Metering Infrastructure control systems. Heterogeneous transmission environments are examined — GSM/GPRS, LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), Power Line Communication, and IP networks — with a focus on command spoofing attacks, unauthorized subscriber disconnection, meter reading falsification, replay attacks, key compromise, and disruption of service availability. A formalized attack surface model of smart meter infrastructure as a component of critical information infrastructure is proposed.

**Keywords**: smart grid, smart meters, AMI, attack surface, cyber threats, replay attack, LPWAN.

**Вступ.** Цифрова трансформація електроенергетики призвела до масштабного розгортання Advanced Metering Infrastructure (AMI), що складається з інтелектуальних лічильників, концентраторів даних і центральної системи Meter Data Management System (MDMS) [1]. Інтеграція гетерогенних телекомунікаційних каналів — GSM/GPRS, LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), Power Line Communication (PLC) та IP-мереж [2] — суттєво розширює поверхню атаки і робить smart grid одним з пріоритетних об'єктів критичної інформаційної інфраструктури [3]. У літературі задокументовано численні випадки маніпуляцій показниками, replay-атак і компрометації ключів у польових розгортаннях AMI [4, 5]. Чинні стандарти задають перелік контролів безпеки, проте не пропонують компактного формалізму, який пов'язує конкретний канал зв'язку з реалізовністю окремих категорій загроз.

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення формалізованої моделі поверхні атаки телекомунікаційних каналів обміну даними розумних лічильників у smart grid-середовищі, що систематизує кіберзагрози за типом каналу та вектором атаки.

**Постановка проблеми.** Чинні стандарти кібербезпеки smart grid (NIST IR 7628, IEC

62351) задають каталог контролів і вимог до криптозахисту [1, 2], проте не формалізують відповідність «канал ↔ загроза» у компактному вигляді, придатному для оцінювання залишкового ризику. Огляди безпеки AMI [4, 5] зосереджуються на окремих типах атак (false data injection, фізичне втручання) без явного розрізнення поведінки тих самих загроз у різних телекомунікаційних середовищах. У результаті оператор не має формального інструменту для пріоритизації заходів захисту з урахуванням гетерогенності каналів зв'язку та властивостей кожного середовища передавання [6].

**Розв'язання проблеми.** Запропоновано модель поверхні атаки smart meter infrastructure як кортеж

$$AS = \langle E, C, T, V \rangle, \quad (1)$$

де $E = \{SM, DC, HES, MDMS\}$ — множина сутностей-вузлів (smart meter, data concentrator, head-end system, meter data management system); $C = \{c_{GSM}, c_{LPWAN}, c_{PLC}, c_{IP}\}$ — множина типів каналів зв'язку; $T = \{T1, \dots, T6\}$ — множина категорій загроз: T1 — підміна команд, T2 — несанкціоноване відключення абонента, T3 — фальсифікація показників, T4 — replay-атака, T5 — компрометація криптографічних ключів, T6 — порушення доступності; $V: C \times T \to [0; 1]$ — функція реалізовності, що відображає кожну пару «канал, загроза» у нормований показник.

Структуру AMI зі співвіднесенням каналів і вузлів подано на рис. 1. Інтерфейси SM ↔ DC реалізуються переважно через PLC або LPWAN; інтерфейси DC ↔ HES — через GSM/GPRS, LPWAN або IP; внутрішні інтерфейси HES ↔ MDMS — IP/IPsec. Значення V обчислюється як композиція технологічних факторів каналу (наявність шифрування, керування ключами, контроль цілісності) та властивостей загрози (необхідний рівень доступу, обчислювальні витрати атаки).

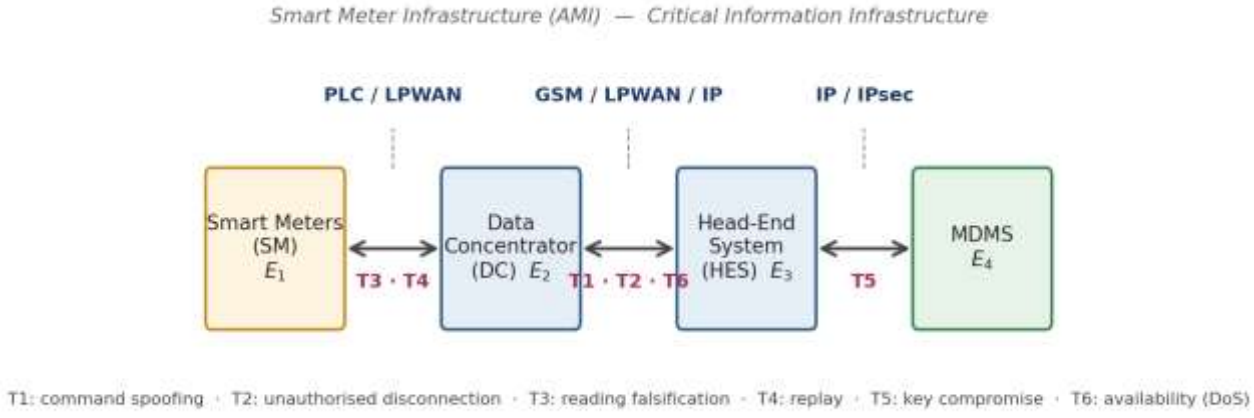



Рис. 1. Архітектура AMI з відображенням каналів зв'язку та категорій кіберзагроз

Карту реалізовності загроз у каналах AMI за результатами застосування моделі до типового розгортання подано в табл. 1. Виявлено критичні поєднання: T1, T2 і T6 у каналах GSM/GPRS та LPWAN мають високу реалізовність через обмежений криптозахист на канальному рівні, тоді як IP-сегмент HES ↔ MDMS з IPsec/TLS забезпечує суттєве зниження ризику. Наукова новизна полягає у введенні параметричної функції реалізовності V, що формалізує перехід від каталогу контролів до кількісної оцінки залишкового ризику для гетерогенної AMI-конфігурації.

Таблиця 1

**Карта реалізовності кіберзагроз у телекомунікаційних каналах AMI**

| № | Загроза | GSM/GPRS | LPWAN | PLC | IP/IPsec |
|---|---|---|---|---|---|
| T1 | Підміна команд | B | B | C | H |
| T2 | Несанкц. відключення | B | B | C | H |
| T3 | Фальсифікація показників | B | B | B | H |
| T4 | Replay-атака | B | C | B | H |
| T5 | Компрометація ключів | C | B | C | H |
| T6 | Порушення доступності | B | B | C | H |

**Висновки.** Запропонована модель поверхні атаки $AS = \langle E, C, T, V \rangle$ для smart meter infrastructure: 1) формалізує реалізовність шести базових категорій кіберзагроз у чотирьох типових телекомунікаційних каналах AMI; 2) виявляє критичні комбінації «канал ↔ загроза» у середовищах GSM/GPRS та LPWAN; 3) забезпечує основу для пріоритизації криптографічних та архітектурних контролів. Практичне значення полягає у застосуванні моделі для проєктування захищених AMI-розгортань та обґрунтування інвестицій у безпеку smart grid як складової критичної інформаційної інфраструктури.

## References


1. NIST IR 7628 Rev. 1: Guidelines for Smart Grid Cybersecurity. National Institute of Standards and Technology (2014). doi.org/10.6028/NIST.IR.7628r1
2. IEC 62351: Power systems management and associated information exchange — Data and communications security. International Electrotechnical Commission, Geneva (2020).
3. ENISA Threat Landscape 2024. European Union Agency for Cybersecurity, Athens (2024). doi.org/10.2824/0710888
4. Liu, Y., Ning, P., Reiter, M.K.: False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids. ACM Trans. Inf. Syst. Secur. 14(1), 13:1–13:33 (2011). doi.org/10.1145/1952982.1952995
5. Mrabet, Z.E., Kaabouch, N., El Ghazi, H., El Ghazi, H.: Cyber-security in smart grid: Survey and challenges. Comput. Electr. Eng. 67, 469–482 (2018). doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.01.015
6. Khokhlachova, Yu., Khoroshko, V., Pyskun, I.: Quantitative assessment and determination of the level of cyber security of state information systems. Ukr. Sci. J. of Information Security 26(3), 169–175 (2020). doi.org/10.18372/2225-5036.26.14974

# ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНОГО MAC-ФЛУДИНГУ У VLAN-ТРАФІКУ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Палагін В.В., Івченко О.В., Палагіна О.А., Зорін О.С.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. Розглядається проблема виявлення MAC-flooding атак у сучасних мережевих інфраструктурах, яка є особливо актуальною при малоінтенсивних прихованих (stealth) загрозах. Традиційні системи виявлення вторгнень (IDS), що базуються на сигнатурному підході, часто виявляються неспроможними ідентифікувати такі атаки або можуть генерувати надмірну кількості хибнопозитивних спрацювань. У дослідженні запропоновано інший підхід для детекції таких атак, який поєднує аналіз ентропії Шеннона для MAC-адрес із класифікацією методами машинного навчання. Шляхом моделювання двох різних сценаріїв інтенсивного флудінгу та прихованого спуфінгу проведено порівняльну оцінку ефективності моделей К-найближчих сусідів (KNN), методу опорних векторів (SVM) та випадкового лісу (Random Forest). Експериментальні результати показали, що хоча сигнатурні методи зберігають прийнятну точність (~0.96) для агресивних атак, їхня ефективність критично падає до 0.72 у прихованих сценаріях. Запропонований підхід, який використовує інтелектуальні класифікатори, демонструє високу точність (до 1.0 показника F1-міри) і випереджає традиційні методи на 28% в умовах прихованих атак.

**Ключові слова**: система виявлення вторгнень (IDS), MAC-flooding, прихована атака (Stealth Attack), аналіз мережевого трафіку, машинне навчання, ентропія Шеннона.

# STEALTH MAC-FLOODING DETECTION IN VLAN TRAFFIC USING ML METHODS

**Palahin V., Ivchenko O., Palahina O., Zorin O.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper addresses the problem of detecting MAC flooding attacks in modern network infrastructures, which is particularly relevant for low-intensity stealth threats. Traditional intrusion detection systems (IDS) based on the signature approach often fail to identify such attacks or may generate an excessive number of false positives. The study proposes another approach for detecting such attacks, which combines Shannon entropy analysis for MAC addresses with classification using machine learning methods. By modeling two different scenarios — intensive flooding and stealth spoofing — a comparative assessment of the effectiveness of K-nearest neighbors (KNN), support vector machine (SVM), and random forest models was conducted. Experimental results showed that although signature methods maintain acceptable accuracy (~0.96) for aggressive attacks, their effectiveness drops critically to 0.72 in stealth scenarios. The proposed approach, which uses intelligent classifiers, demonstrates high accuracy (up to 1.0 for F1-measure indicators) and outperforms traditional methods by 28% in the conditions of stealth attacks.

**Keywords**: intrusion detection system (IDS), MAC flooding, stealth attack, network traffic analysis, machine learning, Shannon Entropy.

**Вступ**. Атака типу MAC Flooding полягає в інтенсивному надсиланні зловмисником кадрів із фальсифікованими джерельними MAC-адресами. Це призводить до швидкого витіснення легітимних записів із CAM-таблиці та її повного заповнення. У такому стані комутатор переходить у режим "fail-open" (режим хаба), починаючи трансляцію всього вхідного трафіку на всі порти (unicast flooding), що дозволяє зловмиснику здійснювати перехоплення конфіденційної інформації [1, 2] через пасивний сніфінг без додаткових маніпуляцій із протоколами, що робить таку атаку дуже ефективною для збору конфіденційної інформації (The Mechanics of Sniffing in Flooded Networks, OWASP Foundation). Атака працює не лише за рахунок об'єму, а й за рахунок швидкості. Оскільки записи в CAM-таблиці мають обмежений час життя (aging time), хакер постійно оновлює тисячі фальшивих записів, не даючи комутатору шансу зберегти адресу реального сервера або робочої станції.

Критичність переповнення CAM-таблиці виходить за межі одного пристрою, створюючи загрозу для всієї інфраструктури. Окрім ризику витоку даних через сніфінг, атака

спричиняє деградацію пропускної здатності мережі та може спровокувати відмову в обслуговуванні (DoS) [3]. Сучасні дослідження підкреслюють, що стандартні методи захисту, такі як Port Security, часто виявляються недостатніми проти інтелектуальних атак, що вимагає впровадження моніторингу на основі статистичних аномалій [4].

**Мета роботи**. Метою даного дослідження є розробка та верифікація методу інтелектуального моніторингу трафіку для виявлення атак типу MAC-Flooding у динамічних мережевих середовищах. Основна увага приділяється створенню алгоритму, здатного ефективно диференціювати зловмисну активність низької інтенсивності (stealth-атаки) від легітимного зростання кількості мережевих пристроїв (гостьовий доступ, BYOD), що є критичним недоліком традиційних систем захисту.

Робота охоплює теоретичне обґрунтування застосування ентропії Шеннона для аналізу MAC flooding-трафіку, методику вилучення ключових ознак і впровадження методу «розумної розмітки» даних, із подальшою верифікацією результатів через серію експериментів та формулюванням підсумкових висновків.

**Постановка задачі**. Сучасні дослідження в галузі мережевої безпеки вказують на необхідність переходу від жорстких сигнатур до гібридних систем, що поєднують аналіз аномалій з методами машинного навчання. Використання статистичних ознак, таких як ентропія, дозволяє ідентифікувати атаку навіть за відсутності прямої відповідності відомій сигнатурі. У контексті моніторингу трафіку використання ентропії дозволяє кількісно оцінити структуру трафіку через два критичні стани [5]:

стан низької ентропії (Норма), коли у типовій мережевій взаємодії невелика кількість пристроїв генерує стабільний потік пакетів;

стан високої ентропії (Атака): Під час MAC-Flooding атаки зловмисник генерує безліч унікальних адрес. Це призводить до того, що ймовірність появи кожної окремої адреси у часовому вікні спостереження тривалістю $T$ стає дуже малою та рівномірною ($P(x_1) \approx P(x_2) \approx \ldots \approx P(x_n)$). За умови рівномірного розподілу ймовірностей ентропія досягає свого максимуму, що призводить до "інформаційного хаосу". Задача полягає у використанні математичної переваги застосування ентропії для ідентифікації трафіку з ознаками атаки типу прихованого MAC-Flooding.

**Вирішення проблеми**. Методологія дослідження базується на проведенні серії експериментів із використанням синтезованого мережевого трафіку, розділеного на три характерні фази для комплексної перевірки гіпотези про перевагу ентропійного аналізу. На першому етапі (Phase 1) моделюється стандартна легітимна активність стаціонарних вузлів VLAN, що формує базовий рівень ентропії. Другий етап (Phase 2) передбачає впровадження низькоінтенсивної атаки типу MAC-Flooding («Stealth-атака»), де зловмисник маніпулює обмеженою кількістю унікальних адрес, намагаючись залишитися нижче порогів спрацювання традиційних систем захисту. Заключний етап (Phase 3) імітує сценарій «шумного офісу» (Flash Crowd) із різким зростанням кількості нових легітимних пристроїв, що дозволяє оцінити стійкість запропонованого методу до хибнопозитивних спрацювань. Порівняльний аналіз проводиться між класичним сигнатурним підходом та інтелектуальними моделями машинного навчання, що базуються на статистичних ознаках та ентропії Шеннона, для визначення найбільш ефективного алгоритму виявлення аномалій у мережевих середовищах.

Наукова задача дослідження полягає у розробці математичної моделі та алгоритмічних засобів ідентифікації аномальної мережевої активності типу MAC-Flooding у динамічних сегментах VLAN. Формально задача зводиться до побудови оптимальної класифікаційної функції $F : \boldsymbol{V} \rightarrow \{0, 1\}$, яка на основі вектора ознак $V_k = \{entropy, mac_{count}, arp_{ratio}, jitter_{std}\}$, вилучених методом ковзного вікна, забезпечує максимізацію ймовірності виявлення прихованих атак ($P_d \rightarrow 1$) при жорсткому обмеженні на рівень хибнопозитивних спрацювань ($P_{fd} \rightarrow 0$) в умовах високої інтенсивності легітимного підключення нових пристроїв (BYOD, гостьовий доступ). Розв'язання цієї задачі передбачає перехід від детермінованого сигнатурного аналізу до метричного та ансамблевого оцінювання станів мережі у багатовимірному просторі статистичних параметрів, що дозволяє диференціювати структурний хаос атаки від кількісного шуму легітимних користувачів.

Для коректного навчання моделей було розроблено алгоритм інтелектуальної розмітки часових вікон, що базується на часовій детермінованості фаз моделювання. Структурна схема паплайну експерименту представлена на рис.1, де продемонстровано: Stage 1 - для формування репрезентативного набору даних, що імітує складні умови експлуатації динамічної VLAN-мережі; Stage 2 - трансформація мережевого трафіку в аналітичні вектори ознак за допомогою розробленого екстрактора ; Stage 3 - підготовка та розмітка даних; Stage 4: – реалізація моделей та їх аналіз.

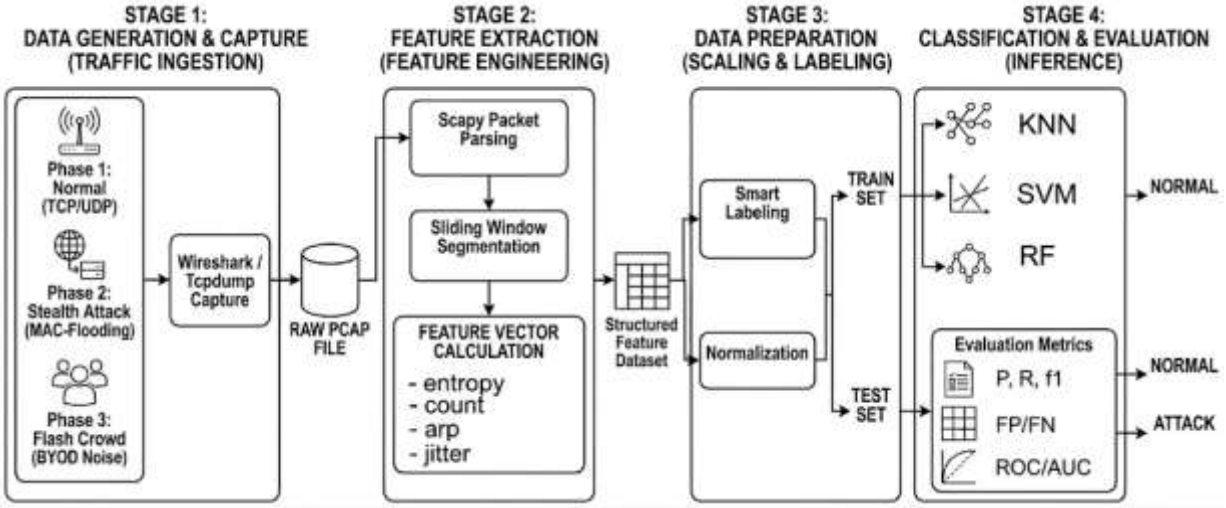



Рис. 1. Конвеєр обробки даних для виявлення MAC-Flooding

В роботі проведена розробка адаптивного методу виявлення низькоінтенсивних (Stealth) MAC-Flooding атак на основі мультипараметричного аналізу ентропії та протокольних девіацій у динамічних мережевих середовищах. Експериментальні результати показали, що хоча сигнатурні методи зберігають прийнятну точність (~0.96) для агресивних атак, їхня ефективність критично падає до 0.72 у прихованих сценаріях. Запропонований підхід, який використовує інтелектуальні класифікатори, демонструє високу точність (до 1.0 показника F1-міри) і випереджає традиційні методи на 28% в умовах прихованих атак.

**Висновок**. Головна перевага інтелектуальної обробки трафіка полягає у здатності систем машинного навчання аналізувати багатовимірні дані, а не поодинокі параметри. Це дозволяє виявляти «тихий злом» за специфічним статистичним «відбитком», який зловмисник не може приховати, навіть штучно занижуючи швидкість атаки. Таким чином, інтелектуальний аналіз забезпечує необхідний рівень адаптивності та надійності, недоступний для класичних систем на основі правил. Навіть якщо кількість MAC-адрес залишається невеликою, висока ентропія видає штучну природу трафіку, що дозволяє ML-моделям «бачити» атаку там, де сигнатурний метод або нічого не підозрює, або блокує всіх підряд.

Комбінація статистичного аналізу та легких ML-моделей забезпечує необхідний баланс між високою точністю детекції та здатністю системи реагувати на загрози миттєво, що є ключовою вимогою для сучасних систем класу IPS (Intrusion Prevention Systems).

## Список використаних джерел


1. F. Semperboni, ‘‘Protecting against MAC flooding attack’’, Cisco-Zine. [Online]. Accessed: Jul. 08, 2023. https://www.ciscozine.com/protecting-against-mac-flooding-attack/.
2. Cisco, ‘‘MAC address limiting on service instances and bridge domains’’. [Online]. Accessed: Apr. 03, 2026. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/cether/configuration/guide/ce_mac-addlmt-bdsin.html.
3. H. Hassan Habibi Gharakheili et al., “DDoS Detection Using Entropy-Based Features and Machine Learning in SDN,” Nature Publishing Group (Scientific Reports), 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-67984-w
4. S. Soo-Yeon Ji, B. Sung-Ho Kim, and J. Jong-Hwan Kim, “ENTVis: Visual Analytics for Entropy-Based Network Traffic Anomaly Detection,” IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 36, no. 4, pp. 60–70, 2016. DOI: 10.1109/MCG.2015.97
5. M. Mohammad Reza Keyvanpour et al., “Network Traffic Anomaly Detection Using Rényi Entropy,” Cybersecurity, Springer, vol. 7, 2024. DOI: 10.1186/s42400-024-00249-1

# СТРАТЕГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА ВІД ГІБРИДНИХ ЗАГРОЗ

**Побережна З.[1], Набок І.[1], Князєв А.[2]**
[1]Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[2] Національний транспортний університет, Київ, Україна

**Анотація**. Сучасні виклики, з якими стикаються підприємство, потребують розробки нових методів управління. Серед основних впливів на підприємство є гібридні загрози, що чинять деструктивний вплив, який поєднує кібератаки, шпигунство, витік інформації та її дискримінація, економічних вплив через шпигунство і порушення комерційної таємниці. Встановлено, що підвищення рівня інформаційної безпеки дозволить сформувати стійкість підприємства в цілому від зовнішніх загроз. Сформовано основні стратегічні засади для забезпечення інформаційної безпеки підприємств від гібридних загроз. Серед основних ключових елементів стратегічного розвитку підприємства є застосування інформаційних технологій, впровадження інтелектуальних систем аналізу даних для підвищення рівня інформаційної стійкості. Запропонована комплексна система захисту інформації, що включає сукупність методів і засобів, об'єднаних єдиним цільовим призначенням і які забезпечують необхідну ефективність захисту у інформаційній системі підприємства. Доведено, що ефективним інструментом в протидії гібридним загрозам є інтеграція інформаційної безпеки в систему корпоративного управління підприємством.

**Ключові слова**: інформаційна безпека, гібридні загрози, кіберстійкість, стратегічні засади, захист даних, інформаційні технології.

# STRATEGIC PRINCIPLES OF ENSURING ENTERPRISE INFORMATION SECURITY AGAINST HYBRID THREATS

**Poberezhna Z.[1], Nabok I.[1], Kniaziev A.[2]**
[1]State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine
[2] National Transport University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Modern challenges affecting businesses require the development of new management methods. Among the main impacts on the enterprise are hybrid threats, which have a destructive impact that combines cyberattacks, espionage, information leakage and its discrimination, economic impact through espionage and violation of commercial secrets. It has been established that increasing the level of information security will allow to form the resilience of the enterprise as a whole from external threats. The main strategic principles for ensuring the information security of enterprises from hybrid threats have been formed. Among the main key elements of the strategic development of the enterprise are the use of information technologies, the implementation of intelligent data analysis systems to increase the level of information resilience. A comprehensive information protection system is proposed, which includes a set of methods and means united by a single purpose and which provide the necessary effectiveness of protection in the enterprise's information system. It has been proven that an effective tool in countering hybrid threats is the integration of information security into the enterprise's corporate management system.

**Keywords**: Information Security, Hybrid Threats, Cyber Resilience, Strategic Principles, Data Protection, Information Technology.

**Вступ**. Розвиток інформаційних систем та технологій сприяє змінам в обміні різних видів інформації між суб'єктами, що дозволяє оперативно вирішувати багато завдань. Перед підприємствами постачає задача захисту даних і збереження інформації від гібридних загроз, що становлять небезпеку через інформаційний вплив (поширення дезінформації, маніпуляції), економічний вплив (шпигунство, витік конфіденційних даних), кібератаки на системи функціонування підприємства, що призводить до збоїв в роботі [1, 2]. Основним завдання для підприємств є забезпечення високого рівня інформаційної безпеки (ІБ), що формують вимоги до підсистем забезпечення захисту інформації та використовуються на підприємстві через контроль за їх виконанням, розробляються плани довгострокового та середньострокового розвитку програми інформаційної безпеки, реалізується низка інших

важливих заходів, спрямованих на досягнення необхідного рівня інформаційної безпеки. До об'єктів захисту інформації зазвичай відносять програмно-технічні комплекси обробки та зберігання інформації, автоматизовані системи управління та інформаційних систем, програмно-технічні комплекси підтримки, системи документообігу. Система інформаційної безпеки підприємства щодо протидії гібридним загрозам полягають у тому, щоб забезпечити своєчасний безперешкодний доступ до інформаційних ресурсів, створити потужний захист від збоїв, що ведуть до втрати інформації, захист від несанкціонованих змін чи знищення даних, зробити обмежений доступ до конфіденційної інформації, забезпечити загальну повноту і точність інформації.

**Метою цього дослідження** є обґрунтування та розробка стратегічних засад забезпечення інформаційної безпеки підприємства в умовах гібридних загроз, що передбачає формування концепції захисту інформаційного простору підприємства.

**Постановка задачі**. Сучасний рівень загроз з якими стикаються підприємства потребує розробки нової моделі захисту, що полягає в формуванні стратегічних засад підвищення рівня інформаційної безпеки в системі корпоративного управління. Серед основних стратегічних задач є розробка комплексної системи захисту інформації, впровадження інформаційних технологій з шифрування та моніторингу даних, формування цифрової гігієни та аналізу слабких місць, де може здійснюватися вплив гібридних загроз. В контексті цього, проблеми забезпечення рівня інформаційної безпеки від гібридних загроз набувають особливої актуальності, що потребує розробки стратегічних засад не лише з технічного напряму, а й економічного та національного, оскільки це дозволить сформувати стійкість підприємства в цілому від зовнішніх загроз.

**Вирішення задачі**. В сучасних умовах господарювання та розвитку цифровізації, інформація стає потужним інструментом впливу на підприємство. Недостатній рівень системи захисту підприємства від впливу зовнішніх загроз призводить до його вразливості. Зростає важливість розробки безпекової системи, яка дозволяє забезпечити високий рівень інформаційної безпеки проти гібридних загроз, таких як кібератаки, економічний шантаж, інформаційні атаки [3-5]. Варто зазначити, що гібридні загрози трансформуються і вже наносять не лише військовий, політичний вплив, але включають ransomware-атаки, дискредитацію інформації в новинах тощо. Для подолання впливу гібридних загроз необхідним є не лише технічний захист, а й розробка стратегічних програм, що спрямовані на забезпечення високого рівня ІБ.

Для забезпечення інформаційної безпеки підприємств від гібридних загроз необхідним є реалізація таких стратегічних засад:

- прогнозування та своєчасне виявлення загроз безпеці, причин та умов, що сприяють нанесенню фінансової, матеріальної та моральної шкоди;
- створення умов діяльності підприємства з найменшим ризиком реалізації загроз інформаційній безпеці, інформаційних ресурсів та нанесення різних видів збитків;
- створення механізму та умов для ефективного реагування на загрози інформаційної безпеки на основі використання правових, організаційних та технічних засобів.

Оскільки гібридні загрози досить різноманітні, цілі захисту можуть бути досягнуті лише шляхом створення комплексної системи захисту інформації, під якою розуміється сукупність методів і засобів, об'єднаних єдиним цільовим призначенням і які забезпечують необхідну ефективність захисту у інформаційній системі підприємства, що наведена на рис.1.

Запропонована система захисту інформації є основою створення політики забезпечення ІБ для підприємства, яка координує діяльність всіх структурних підрозділів із забезпечення рівня інформаційного захисту[6]. Прийняття рішень та проведення заходів, що спрямовані на запобігання, виявлення та усунення наслідків гібридних загроз мають бути спрямовані на пошук нових рішень, спрямованих на вдосконалення забезпечення ІБ.

Система захисту інформації базується на можливості використання підприємством сучасних інформаційних технологій, таких як застосування сучасних технічних засобів обробки та передачі інформації, підвищення рівня конфіденційності, системи доступу до

інформаційних ресурсів користувачів, а також каналів взаємодії з глобальною мережею. Основу запропонованої концепції складають теоретичні положення оцінки ризиків, зокрема, принципи ALARA (as low as reasonable), який передбачає, що діяльність щодо зниження рівня ризиків має узгоджуватися з реальними можливостями підприємства [7].

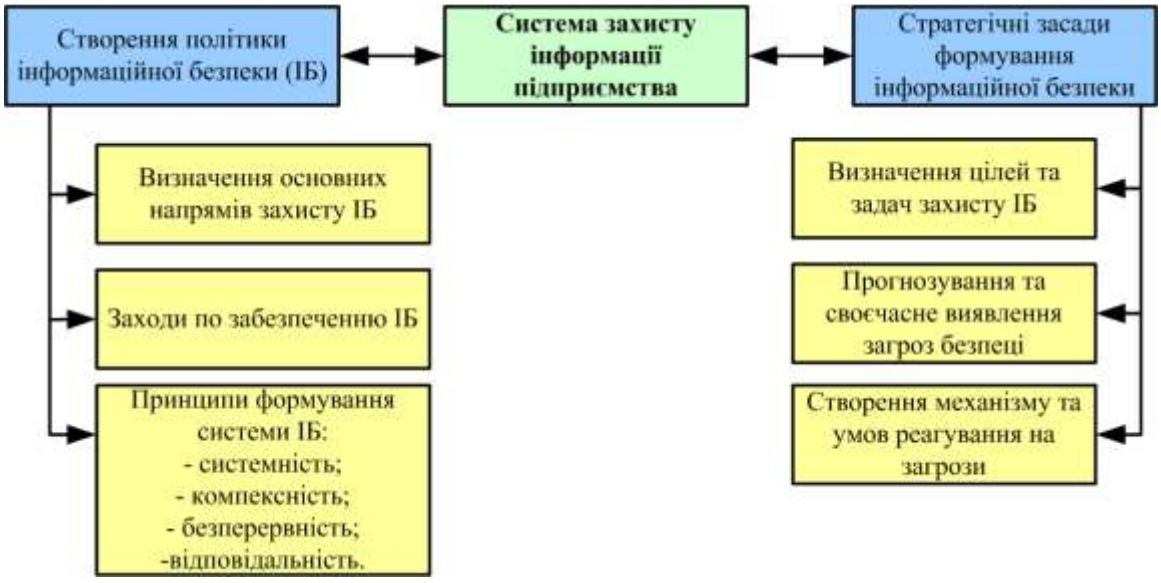



Рис. 1. Комплексна системи захисту інформації підприємства

**Висновки**. Результати проведеного дослідження дали змогу встановити, що в сучасних умовах розвитку технічного прогресу та цифровізації рівень захисту і збереження інформації є першочерговим завданням для підприємства, особливо в умовах гібридних загроз. В контексті цього, необхідним є розробка комплексного підходу до забезпечення інформаційної безпеки підприємства. Встановлено, що гібридні загрози трансформуються і стають дедалі складнішими і комбінованими, що поєднують кібератаки, інформаційний та репутаційний впливи. Доведено, що в протистоянні гібридним загрозам необхідним є впровадження політики інформаційної безпеки на підприємстві, що дозволить підвищити кіберстійкість та здатність ефективного функціонування навіть в умовах успішної атаки на підприємство, швидко відновлюючи критично важливі процеси. Підвищення рівня інформаційної безпеки дозволить підприємству зберегти свою конкурентоспроможність та стійкість у мінливому цифровому просторі.

## References


1. Кицюк В. М., Пупинін О. С. Інформаційна безпека підприємства: теоретичний аспект. Сучасний захист інформації 2 (58), 103-108 (2024). https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.020012
2. Величко Л. Ю., Білоконь М. В. Гібридні загрози транспортній інфраструктурі: виклики для державного регулювання та національної безпеки. Теорія та практика державного управління 2 (79), 442–464 (2024). http://doi.org/10.26565/1727- 6667-2024-2-23
3. Kresin O. Countering Hybrid Threats in Ukrainian Legislation. Foreign Trade: Economics, Finance, Law 1, 4-17 (2022). https://doi.org/10.31617/zt.knute.2022(120)01
4. Almalawi, A., Hassan, S., Fahad, A., Iqbal, A., Khan, A. Hybrid Cybersecurity for Asymmetric Threats: Intrusion Detection and SCADA System Protection Innovations. Symmetry, 17(4), 616 (2025). https://doi.org/10.3390/sym17040616
5. Ясінська А. Інформаційна безпека підприємства: концептуальні засади ефективного захисту інформації. Економіка та суспільство, 56 (2023). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-118
6. Довгань О. Д., Ткачук Т. Ю. Концептуальні засади законодавчого забезпечення інформаційної безпеки України. Інформація і право 1 (28), 86–99 (2019). https://doi.org/10.37750/2616-6798.2019.1(28).221314
7. Селіхов Д. Кібербезпека як складова інформаційної безпеки: теоретичні та прикладні аспекти. Аналітично-порівняльне правознавство 1(1), 94-99 (2026). https://doi.org/10.24144/2788-6018.2026.01.1.14

# КОМПАКТНА ПОБУДОВА 5-БІТНОГО S-БЛОКУ З ХАОТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Розломій І.О.[1], Науменко С.В.[2]**
[1]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2] Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

**Анотація**. У роботі запропоновано метод побудови 5-бітного S-блоку на основі хаотичних відображень для застосування у вбудованих системах та пристроях Інтернету речей, що функціонують в умовах обмежених ресурсів. Розглянуто підхід до генерації нелінійних бієктивних перетворень із використанням хаотичних послідовностей, які формуються за допомогою ітераційних нелінійних відображень та характеризуються високою чутливістю до початкових умов. Це дозволяє забезпечити рівномірний розподіл значень вихідної підстановки та підвищену стійкість до основних типів криптоаналізу, зокрема лінійного та диференційного. Описано структуру S-блоку у вигляді таблиці розміром 2×16, що забезпечує повне покриття простору вхідних значень і спрощує апаратну реалізацію. Розглянуто особливості інтеграції запропонованого S-блоку у блокові шифри різної розрядності з урахуванням обробки залишкових бітів. Проведено аналіз адаптації S-блоку до різних розмірів вхідних блоків даних, що дозволяє оцінити ефективність його використання у сучасних криптографічних алгоритмах. Отримані результати підтверджують доцільність застосування запропонованого підходу для забезпечення необхідного рівня криптографічної надійності при мінімальних витратах обчислювальних та апаратних ресурсів, що є критично важливим для IoT-пристроїв та вбудованих систем.

**Ключові слова**: S-блок, полегшена криптографія, хаотичні відображення, IoT-пристрої, вбудовані системи, блокові шифри.

# COMPACT 5-BIT S-BOX CONSTRUCTION WITH CHAOTIC PROPERTIES FOR IOT DEVICES

**Rozlomii I.[1], Naumenko S.[2]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper proposes a method for constructing a 5-bit S-box based on chaotic mappings for use in embedded systems and Internet of Things devices operating under resource constraints. An approach to generating nonlinear bijective transformations using chaotic sequences is presented, where the sequences are produced by iterative nonlinear mappings characterized by high sensitivity to initial conditions. This enables uniform distribution of substitution values and improves resistance to major types of cryptanalysis, including linear and differential attacks. The structure of the S-box is described as a 2×16 table, which ensures full coverage of the input space and simplifies hardware implementation. The features of integrating the proposed S-box into block ciphers of various sizes are considered, including the processing of remaining bits. An analysis of adapting the S-box to different input block sizes is carried out, allowing evaluation of its applicability in modern cryptographic algorithms. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach in achieving a balance between cryptographic strength and resource efficiency. This makes the method suitable for practical implementation in resource-constrained embedded platforms and IoT devices.

**Keywords**: S-box, lightweight cryptography, chaotic mapping, IoT devices, embedded systems, block ciphers.

**Вступ**. У сучасних вбудованих системах та мережах Інтернету речей спостерігається зростаюча потреба у криптографічних механізмах, здатних ефективно функціонувати в умовах обмежених обчислювальних, енергетичних та ресурсів пам’яті [1]. Одним із ключових елементів блокових шифрів є S-блоки, що забезпечують нелінійність перетворень і визначають стійкість алгоритмів до основних типів криптоаналізу. Традиційні підходи до побудови S-блоків, зокрема 8-бітні структури, характеризуються високим рівнем криптографічної стійкості, однак потребують значних ресурсних витрат, що обмежує їх використання у вбудованих пристроях [2]. З іншого боку, 4-бітні S-блоки є більш

ефективними з точки зору реалізації, проте поступаються за криптографічними властивостями [3]. У цьому контексті актуальним є дослідження проміжних рішень, зокрема 5-бітних S-блоків, які дозволяють досягти компромісу між рівнем безпеки та ресурсною ефективністю. Перспективним підходом до їх побудови є використання хаотичних відображень, що забезпечують високий рівень псевдовипадковості та нелінійності. Водночас існуючі підходи до побудови S-блоків не завжди враховують обмеження вбудованих платформ, що проявляється у підвищених витратах пам'яті та енергоспоживання. Це зумовлює необхідність розроблення нових методів, орієнтованих на досягнення оптимального співвідношення між криптографічною стійкістю та ефективністю реалізації.

**Мета роботи**. Метою роботи є розробка методу побудови 5-бітного S-блоку на основі хаотичних відображень, що забезпечує збалансоване поєднання криптографічної стійкості та ресурсної ефективності для застосування у пристроях Інтернету речей.

**Постановка задачі**. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачу розробки методу генерації 5-бітного S-блоку, який забезпечує бієктивність відображення, відсутність фіксованих точок та відповідність критеріям криптографічної стійкості, зокрема Strict Avalanche Criterion. Формування елементів S-блоку повинно базуватися на використанні хаотичних послідовностей, що генеруються на основі нелінійних відображень, з метою забезпечення високої нелінійності та рівномірного розподілу значень. Крім того, необхідно забезпечити можливість ефективної інтеграції запропонованого S-блоку у структури блокових шифрів різної розрядності без суттєвого збільшення обчислювальних витрат та апаратної складності. Окрему увагу необхідно приділити забезпеченню простоти апаратної реалізації, що є критичним фактором для мікроконтролерних платформ та edge-пристроїв.

**Вирішення проблеми**. Побудова 5-бітного S-блоку здійснюється на основі використання хаотичного відображення, що забезпечує формування нелінійної та псевдовипадкової підстановки. Генерація хаотичної послідовності може бути описана ітераційним співвідношенням логістичного відображення: $x_i + 1 = r \cdot x_i(1 - x_i)$, де $r$ – параметр керування, а $x_i \in (0,1)$ – поточне значення послідовності. Вибір параметра $r$ у діапазоні хаотичної поведінки забезпечує високий рівень псевдовипадковості.

Запропонований підхід передбачає генерацію послідовності значень у діапазоні $(0,1)$ з подальшим впорядкуванням елементів множини $\{0,1,\dots,31\}$ відповідно до отриманих значень. Такий підхід дозволяє сформувати бієктивне відображення, що є необхідною умовою коректного функціонування криптографічних перетворень.

Для реалізації S-блоку використовується таблична структура розміром 2×16, де старший біт вхідного слова визначає рядок, а молодші біти – позицію в стовпці. Це дозволяє забезпечити повне покриття всіх можливих вхідних значень без дублювання та втрати інформації. Загальна схема побудови S-блоку наведена на рис. 1.

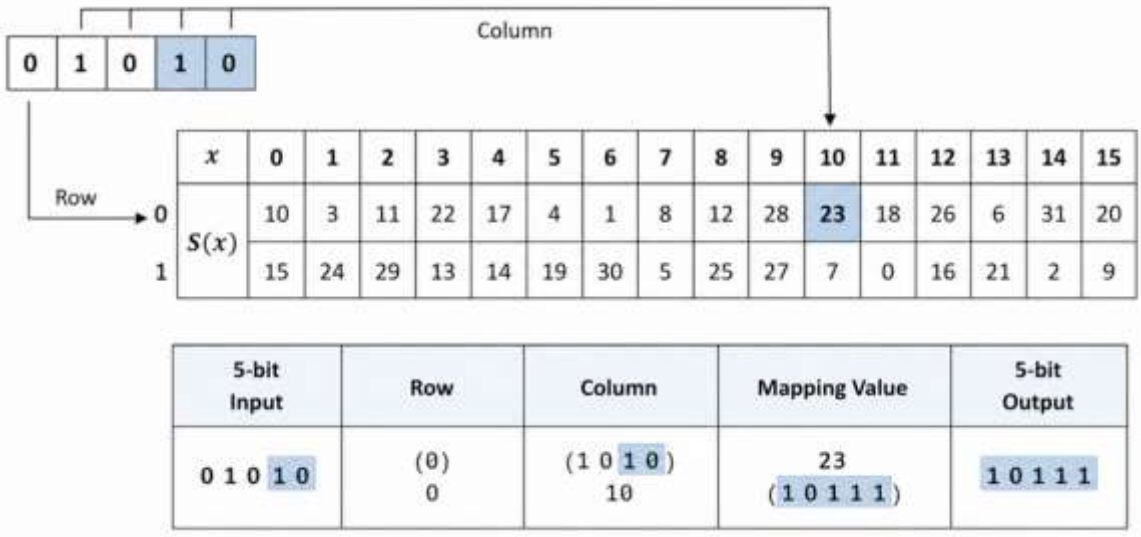



Рис. 1. Структура 5-бітного S-блоку

На рисунку 1 зображено організацію S-блоку у вигляді двовимірної таблиці, яка відображає відповідність між 5-бітними вхідними та вихідними значеннями. Така структура забезпечує простоту апаратної реалізації та дозволяє ефективно інтегрувати S-блок до складу блочних шифрів різної розрядності. Представлена структура також дозволяє зменшити затримки доступу до елементів таблиці та спрощує адресацію при апаратній реалізації, що є важливим для систем реального часу.

Формування значень S-блоку базується на використанні хаотичного відображення, що характеризується високою чутливістю до початкових умов. Це забезпечує нерегулярний розподіл елементів та підвищує стійкість до лінійного та диференційного криптоаналізу. Додатково враховуються критерії відсутності фіксованих точок та виконання лавинного ефекту, що підвищує криптографічну надійність.

Для оцінювання можливості застосування запропонованого S-блоку у криптографічних алгоритмах різної розрядності проведено аналіз його інтеграції у блоки даних. Аналіз інтеграції S-блоку проводиться з урахуванням різної довжини вхідних блоків даних, що характерно для сучасних криптографічних алгоритмів. Результати узагальнення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Адаптація 5-бітного S-блоку до різних розмірів блоків даних**

| Розмір блоку | Обробка S-блоком | Залишкові біти |
|---|---|---|
| 32 біти | 6 × 5-біт | 2 біти |
| 48 біт | 9 × 5-біт | 3 біти |
| 64 біти | 12 × 5-біт | 4 біти |
| 128 біт | 25 × 5-біт | 3 біти |

Аналіз отриманих результатів показує, що більша частина вхідного блоку може бути ефективно оброблена за допомогою S-блоку, тоді як залишкові біти можуть бути інтегровані в криптографічний процес за допомогою допоміжних операцій, таких як перестановки або комбінування з сусідніми сегментами. Це дозволяє забезпечити гнучкість використання запропонованого підходу без істотного ускладнення алгоритму та збереження його ресурсної ефективності.

**Висновок**. У роботі запропоновано метод побудови 5-бітного S-блоку на основі хаотичних відображень, який забезпечує формування нелінійних бієктивних перетворень із високими криптографічними властивостями. Використання хаотичних послідовностей дозволяє досягти рівномірного розподілу елементів та підвищити стійкість до основних типів криптоаналізу. Розроблена структура S-блоку характеризується простотою реалізації та можливістю ефективної інтеграції у блокові шифри різної розрядності. Проведений аналіз показав, що запропонований підхід забезпечує раціональне використання ресурсів при збереженні необхідного рівня криптографічної надійності, що робить його придатним для застосування у вбудованих системах та пристроях Інтернету речей.

## Список використаних джерел


1. Rozlomii I., Yarmilko A., Naumenko S. Data security of IoT devices with limited resources: challenges and potential solutions. Proceedings of the 4th Edge Computing Workshop (DOORS 2024). 2024. Vol. 3666. P. 85–96. URL: https://ceurws.org/Vol-3666/paper13.pdf
2. Yakymenko, I., Karpinski, M., Shevchuk, R., & Kasianchuk, M. (2024). Symmetric encryption algorithms in a polynomial residue number system. Journal of Applied Mathematics, 2024(1), 4894415. https://doi.org/10.1155/2024/4894415
3. Nam, T. S., Van Long, N., & Cuong, N. B. (2023). An optimized bit-slice implementation of secure 8-bit S-box based on butterfly structure. In 2023 15th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE) (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/KSE59128.2023.10299514

# МЕХАНІЗМИ БЕЗПЕКИ СМАРТ-КОНТРАКТІВ ТА ЦИФРОВИХ ПІДПИСІВ

**Сагун А.В.[1], Панаско О.М.[2]**
[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У статті досліджено вплив криптографічних геш-функцій на безпеку блокчейн-систем. Визначено взаємозв'язок між вибором алгоритмів гешування (Keccak-256) та стійкістю цифрових підписів ECDSA. Проаналізовано механізми захисту від Replay-атак та кросконтекстних вразливостей через впровадження стандартів EIP-155, EIP-191 та EIP-712.

Розроблено та протестовано у середовищі Remix IDE смарт-контракт HashSignatureVerifier (Solidity), що реалізує верифікацію підписів через прекомпільований контракт ecrecover. Експериментально підтверджено лавинний ефект Keccak-256 та ефективність використання мапінгу для контролю унікальності транзакцій. Доведено, що запропоновані механізми забезпечують цілісність даних та автентифікацію в децентралізованих застосунках.

**Ключові слова:** геш-функція, блокчейн, Keccak-256, ECDSA, перевірка підпису, Ethereum, атака перехресного контексту, перевірка транзакцій у блокчейні, смарт-контракт.

# SECURITY MECHANISMS OF SMART CONTRACTS AND DIGITAL SIGNATURES

**Sagun A.V.[1], Panasko O.M.[2]**
[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The article investigates the impact of cryptographic hash functions on the security of blockchain systems. It determines the correlation between the choice of hashing algorithms (Keccak-256) and the stability of ECDSA digital signatures. The research analyzes defense mechanisms against Replay attacks and cross-context vulnerabilities through the implementation of EIP-155, EIP-191, and EIP-712 standards.

The authors developed and tested the HashSignatureVerifier smart contract (Solidity) in the Remix IDE environment, which implements signature verification via the ecrecover precompiled contract. Experimental results confirmed the avalanche effect of Keccak-256 and the effectiveness of using mapping to control transaction uniqueness. It is proven that the proposed mechanisms ensure data integrity and authentication in decentralized applications.

**Keywords**: hash function, blockchain, Keccak-256, ECDSA, signature verification, Ethereum, cross-context attack, blockchain transaction verification, smart contract.

**Вступ.** Можна виділити технологічну основу цифрової валюти та механізми створення монет або токенів, що побудовано на власних блокчейн-технологіях – біткоїн, Ethereum, XRP, Tezos, EOS, Solana тощо. Базову систему безпеки будь-якої блокчейн-системи становлять криптографічні геш-функції, які забезпечують цілісність даних, автентифікацію учасників та верифікації транзакцій. Комбінація криптовалютних систем з використанням криптографічних методів захисту та блокчейн веде до децентралізації, прозорості, необхідного рівня безпеки. Неправильно обрані геш-функції є джерелом вразливості компрометації. Це порушує безпеку цифрових підписів і цілісність ланцюгів блока транзакцій. Відомі випадки, коли колізії для функції MD5 2004 року [1] сприяли вдалим відповідним атакам на функцію SHA-1 [2] і збоїв блокчейн-систем. Тому розробники таких систем використовують більш стійкіші геш-функції.

**Мета роботи** – розробка механізмів безпеки смарт-контрактів для систем верифікації підписів у децентралізованих застосунках (dApp).

**Постановка задачі** дослідження – знаходженні взаємозалежності геш-функцій і цифрових підписів в блокчейн-технологіях та формуванні механізмів безпеки смарт-контрактів.

**Вирішення проблеми.** Алгоритм роботи криптовалютної системи передбачає, що єдиний керуючий фінансовий орган відсутній, а користувачі системи є абсолютно

анонімними (мають цифрові адреси замість реальних імен), їх записи незмінні. Найпопулярнішим стандартом для токенів є ERC-20 на базі Ethereum.

Механізм EIP-191 №191 від 2016 визначає формат підписаних даних для захисту від кросконтекстних атак. Перед підписанням до гешу додається префікс: $prefixedHash = Keccak - 256(\text{“}\dots\text{”} || txHash)$. Без цього префіксу підпис транзакції може використовуватися для авторизації довільної операції в іншому контексті. Префікс гарантує, що підпис, створений для одного смарт-контракту, не буде дійсним в іншому. EIP-712 розширює цей підхід структурованим гешуванням даних із включенням chainId та адреси контракту. Критичною вразливістю ECDSA є залежність безпеки від повторів ефемерного ключа $k$. Атака хакерів failOverflow відновила приватний ключ Sony через вразливість та змогла підписати власні прошивки [3]. Алгоритм EdDSA RFC 8032 вирішує цю проблему детермінованим вибором $k = H(privKey \,||\, m), k$ є функцією від приватного ключа.

Заголовок блоку Ethereum (Block Header) містить критичні геш-поля: parentHash – Keccak-256 від заголовку попереднього блоку (забезпечує незмінність ланцюжка); stateRoot – корінь дерева Меркла-Патриція глобального стану; transactionsRoot – корінь дерева Меркла всіх транзакцій блоку; receiptsRoot – корінь дерева квитанцій транзакцій.

Для успішної модифікації раніше доданих блоків зловмиснику необхідно виконати перерахунок геш-значення всіх наступних блоків, отримати контроль над більшістю мережі, що є практично неможливим у більшості блокчейн-систем. Ethereum використовує криптографічно захищену структуру даних Merkle Patricia Trie (MPT), що зберігає глобальний стан (баланси рахунків, код, сховище смарт-контрактів). Параметр stateRoot в заголовку блоку є коренем стану MPT. А зміна стану (транзакція) змінює stateRoot та фіксується в блоці. Це забезпечує верифіковану незмінність одночасно транзакцій і результатів їх виконання.

Вартість криптографічних операцій для Keccak-256 (opcode SHA3, 0x20) становить 30 базових + 6 одиниць gas за кожне 32-байтне слово даних; для ecrecover (precompiled contract 0x01) – стала вартість у розмірі 3000 gas незалежно від вхідних даних, стандартна транзакція – це базове споживанням 21 000 gas, операція ADD споживає 3 gas. Попередньо скомпільовані смарт-контракти адресуються як звичайні контракти, але виконуються на рівні реалізації протоколу (0x01 – ecrecover; 0x02 – SHA-256; 0x03 – RIPEMD-160; 0x04 – identity; 0x05-0x08 – операції для BN256). В смарт-контрактах HashSignatureVerifier функція verifySignature() викликає ecrecover через inline assembly, що дозволяє верифікувати ECDSA підписи без імплементації повного алгоритму в Solidity. Це обумовлює значне скорочення споживання обчислювального ресурсу та гарантовану коректність реалізації.

Повторення ефемерного ключа $k$ дозволяє відновити приватний ключ. Крім цього, небезпечним є використання параметру $k$ з малою ентропією [4]. Якщо $k$ передбачуваний чи має певну структуру, зловмисник може використати атаки на основі теорії решіток, що дозволяють відновити privKey після кількох підписів зі слабкими $k$. Реальним прикладом атаки є компрометація TLS-з'єднання при використанні лінійних конґруентних генераторів для отримання $k$ [5]. Згідно NIST SP 800-186 та RFC 6979 слід використовувати детермінований ECDSA (RFC 6979), де $k = HMAC - DRBG(privKey, m)$.

До впровадження EIP-155 транзакції Ethereum mainnet могли відтворюватися в тестових мережах і Ethereum Classic, що спричиняло несумісність із попередніми версіями програмного забезпечення (хардфорк). Це дозволяло зловмисникам повторно використовувати раніше підписані транзакції в інших мережах (replay-атака).

EIP-155 включив chainId у геш, що підписується: signHash = Keccak-256(RLP(nonce, gasPrice, gasLimit, to, value, data, chainId, 0, 0)). Ethereum mainnet: chainId = 1. Goerli: chainId = 5. Polygon: chainId = 137. Підпис з chainId=1 є недійсним в інших мережах.

У смарт-контракті HashSignatureVerifier захист від replay-атак реалізовано за допомогою структури даних mapping hashExists (перевірка існування гешу): кожен унікальний геш транзакції зберігається, а повторна реєстрація ідентичної транзакції відхиляється з помилкою “Duplicate transaction hash”. Рекомендації щодо вибору алгоритму для блокчейн-систем на базі Ethereum можуть передбачати використання Keccak-256, а для загальних застосувань – SHA-256 або SHA-3-256; для систем з вимогами до продуктивності – BLAKE2b; MD5, SHA-1 не рекомендуються для нових криптографічних застосувань.

При тестуванні в середовищі розробки компіляції та розгортання Remix IDE v2.0.4 (Web), мови програмування смарт-контрактів Solidity 0.8.34 та версії програмного коду за Git-комітом 80d5c536 (commit.80d5c536) та симуляції блокчейну Ethereum без реальних коштів в Remix VM (Cancun) в локальній мережі, вбудоване у Remix JavaScript API використано для взаємодії зі смарт-контрактом. Функція Keccak-256 (EVM opcode), яка вбудована в Solidity, використана для гешування даних транзакції. Верифікація ECDSA підпису здійснювалася спеціальним контрактом ecrecover, вбудованим в EVM (precompile 0x01), який відновлює адресу підписувача з ECDSA-підпису. Смарт-контракт HashSignatureVerifier реалізує три криптографічні механізми: гешування, верифікацію цифрового підпису (ECDSA через ecrecover), перевірку цілісності даних (повторне гешування та порівняння).

Таблиця 1

**Результати тестування смарт-контрактів HashSignatureVerifier**

| Функція smart-контракту | Значення унікальної комбінації (геш) | | Підтверджений параметр |
|---|---|---|---|
| | txID: 0 | txID: 0 | |
| computeTransactionHash() | 0x78fb...9be | 0xb1a4...ef7 | детермінованість Keccak-256 |
| checkIntegrity() | True | True | незмінність даних |
| verifySignature() | True | True | коректність ECDSA ecrecover |
| isVerified() | True | True | зміна стану контракту |
| геші при різних timestamp | + | + | лавинний ефект Keccak-256 |
| Захист від дублювання | + | + | Мапінг hExists |

З таблиці 1 видно, що при тестуванні функцій смарт-контрактів лавинний ефект проявився у повній відмінності гешів двох транзакцій, що відрізняються лише полем timestamp (приблизно 60 секунд різниці з 1776097501 до 1776097561).

**Висновок.** Лавинний ефект Keccak-256 є достатньою умовою для використання в системі поточного смарт-контракту, що є підтвердженим. Зміна параметру timestamp на 60 сек веде до повної зміни всіх 256 бітів геш-суми.

Практична реалізація підтверджує коректність верифікації алгоритму з використанням ЕЦП ECDSA на базі ЕК secp256k1 та функції ecrecover, що дозволило відновити реквізити підписанта з підпису та порівняти її з tx.sender без процедури передачі приватного ключа. Поле parentHash зв'язує блоки в незмінний ланцюг, алгоритм MPT забезпечує надійну верифікацію транзакцій, а функція Keccak-256 є нативною операцією EVM з вартістю в gas-одиницях (256-бітна геш-сума забезпечує 128-бітну квантову стійкість).

Розроблений та протестований смарт-контракт HashSignatureVerifier (Solidity 0.8.20) у Remix IDE був успішно розгорнутий з параметрами: transaction hash: 0xb5684a15...; gas: 1 391 730. Тестування пари транзакцій підтвердило необхідні властивості: checkIntegrity()=true, verifySignature()=true для обох txId. Розроблений смарт-контракт може бути основою для систем верифікації підписів у децентралізованих застосунках.

## Список використаних джерел


1. Heilman, E., Kolobov, V. I., Levy, A. M., & Poelstra, A. (2024). ColliderScript: Covenants in Bitcoin via 160-bit hash collisions. Cryptology ePrint Archive, Paper 2024/1802. https://eprint.iacr.org/2024/1802
2. Alamgir, N., Nejati, S., & Bright, C. (2024). SHA-256 collision attack with programmatic SAT. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.20072
3. BBC News. (2011, January 5). Hackers 'fix' Sony's PlayStation 3 security. https://www.bbc.com/news/technology-12116051.
4. Preuß Mattsson, J., Thormarker, E., & Ruohomaa, S. (2025). Hedged ECDSA and EdDSA signatures (Internet-Draft draft-irtf-cfrg-det-sigs-with-noise-05). Internet Engineering Task Force. https://datatracker.ietf.org/doc/draft-irtf-cfrg-det-sigs-with-noise/
5. Sanjaya, S., & Mishra, P. (2026). Sleep reveals the nonce: Breaking ECDSA using sleep-based power side-channel vulnerability. arXiv. https://arxiv.org/abs/2602.01491

# РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ IOT

**Сайко Р., Бєлов С., Заліський М.**
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

**Анотація**. Сьогодні системи Інтернету речей (IoT) стрімко розвиваються. Одночасно із цим також збільшується рівень різноманітних кіберзагроз. У сучасних IoT мережах сьогодні виникає суперечність між економією пропускної здатності локальної мережі та підтримкою високої точності в централізованих системах виявлення вторгнень. Тому метою цього дослідження є підвищення ефективності виявлення вторгнень у мережу IoT на основі нового методу машинного навчання. В основі розробленого методу лежить технологія випадкового лісу, яка була навчена та протестована на наборі даних Edge-IIoTset. Метод використовував 14 статистичних ознак для визначення доброякісного трафіку та 77 ознак для аналізу підозрілих потоків. Експериментальні результати показали відмінну ефективність. Запропонована модель успішно відфільтрувала 96,3% доброякісного трафіку локально, що призвело до зменшення загального обсягу передачі мережевих даних на 22,94%. Водночас вся система досягла високої загальної точності 99,4%. Отже отримані результати засвідчують, що майбутні децентралізовані мережі повинні включати легкі інструменти глибокої перевірки пакетів на периферії для досягнення повної безпеки на рівні додатків.

**Ключові слова**: Інтернет речей, машинне навчання, системи виявлення вторгнень, периферійні обчислення, хмарні обчислення, оптимізація пропускної здатності.

# DISTRIBUTED INTRUSION DETECTION SYSTEM FOR IOT NETWORK

**Saiko R., Bielov S., Zaliskyi M.**
State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Today, Internet of Things (IoT) systems are developing rapidly. At the same time, the level of various cyber threats is also increasing. In modern IoT networks, there is a contradiction between saving local network bandwidth and maintaining high accuracy in centralized intrusion detection systems. Therefore, the purpose of this study is to improve the efficiency of intrusion detection in the IoT network based on a new machine learning method. The developed method is based on random forest technology, which was trained and tested on the Edge-IIoTset dataset. The method used 14 statistical features to identify benign traffic and 77 features to analyze suspicious flows. Experimental results showed excellent performance. The proposed model successfully filtered 96.3% of benign traffic locally, which led to a reduction in the total volume of network data transmission by 22.94%. At the same time, the whole system achieved a high overall accuracy of 99.4%. Therefore, the obtained results indicate that future decentralized networks should include lightweight deep packet inspection tools at the edge to achieve complete application-level security.

**Keywords**: Internet of Things, Machine Learning, Intrusion Detection Systems, Edge Computing, Cloud Computing, Bandwidth Optimization.

**Вступ**. Сьогодні кількість пристроїв, що підключені до Інтернету речей (IoT), стрімко зростає. Причиною цього стали розвиток високошвидкісних бездротових технологій передачі інформації, широке застосування мікроелектронних технологій так хмарних обчислень [1, 2]. Технології IoT наразі застосовуються у різних сферах діяльності людини, зокрема для розумних будинків, під час автоматизації промислових процесів, вдосконаленні транспортної інфраструктури тощо, створюючи при цьому глобальну мережу пристроїв [3-5]. За найскромнішими оцінками експертів, щорічний приріст нових пристроїв, підключених до IoT, відповідає експоненціальній моделі [6-8], а отже досягає кількості в мільярд одиниць. У свою чергу такі масштаби створюють нові виклики. Серед основних цих викликів слід виділити необхідність у вирішенні задач оптимізації керування трафіком, підвищення ефективності функціонування, зменшення витрат, вирішення проблем кібербезпеки тощо [9-11]. При цьому для сучасних IoT мереж сьогодні також виникає суперечність між економією пропускної здатності локальної мережі та підтримкою високої точності в централізованих системах виявлення вторгнень. Загалом, відсутність єдиних та чітких стандартів захисту є передумовою для вразливості мереж IoT щодо великого різноманіття кіберзагроз.

**Метою цього дослідження** є підвищення ефективності виявлення вторгнень у мережу IoT пристроїв на основі застосування нового методу машинного навчання.

**Постановка задачі**. У мережах IoT з периферійними обчисленнями виникає необхідність ефективного виявлення атак з урахуванням ресурсних обмежень. За таких умов відбувається значна втрата інформативності даних, внаслідок чого статистичні характеристики легітимних інтернет запитів та шкідливих веб-атак із вбудованими корисними навантаженнями стають майже нерозрізненими, тобто їхні розподіли ймовірностей практично збігаються. Це призводить до збільшення ймовірності пропущених атак на рівнях аналізу периферії для передачі даних до хмарної інфраструктури. Таким чином, актуальною є розробка методів підвищення точності виявлення атак на рівні додатків у середовищах IoT в умовах обмежених ресурсів, що забезпечує подолання компромісу між обмеженою пам'яттю та забезпеченням достатнього рівня спостережуваності мережевого трафіку.

**Вирішення задачі**. Запропонований метод цього дослідження в системі Інтернету речей базується на використанні набору даних Edge-IIoTset [1], сформованого з реальних пристроїв IoT та що містить понад 70 мережевих ознак та широкий спектр атак. Для забезпечення узагальнення моделей було проведено очищення даних та нормалізація, а атаки згруповано в кілька основних класів.

Ключовою ідеєю є ієрархічний розподіл ознак між периферійним та хмарним рівнями: периферійна модель використовує лише 14 легких статистичних характеристик для швидкої фільтрації трафіку в режимі реального часу, тоді як хмарна модель працює з повним набором із 77 ознак для глибшого аналізу. Такий підхід забезпечує високу продуктивність та економію ресурсів, але обмежує виявлення атак на рівні додатків через відсутність аналізу корисного навантаження. Як ефективний метод класифікації для реалізації обох етапів було обрано алгоритм випадкового лісу.

Навчання моделі в системі IoT здійснювалася з урахуванням обмежень ресурсів: гранична модель має спрощену конфігурацію (обмежена глибина та кількість дерев), тоді як хмарна модель використовує потужніший ансамбль для максимальної точності. Практичне тестування проводилося на великому потоці мережевого трафіку, де периферійний рівень виконує швидку оцінку загроз та передає лише підозрілі пакети для глибокого аналізу в хмарі. Хмарна модель класифікує атаки за типом, після чого результати обох рівнів об'єднуються для оцінки загальної точності системи. Такий підхід забезпечує високу пропускну здатність, ефективне використання ресурсів та точну діагностику загроз. Блок-схема розділеної системи виявлення вторгнень на периферію та хмару наведена на рис. 1.

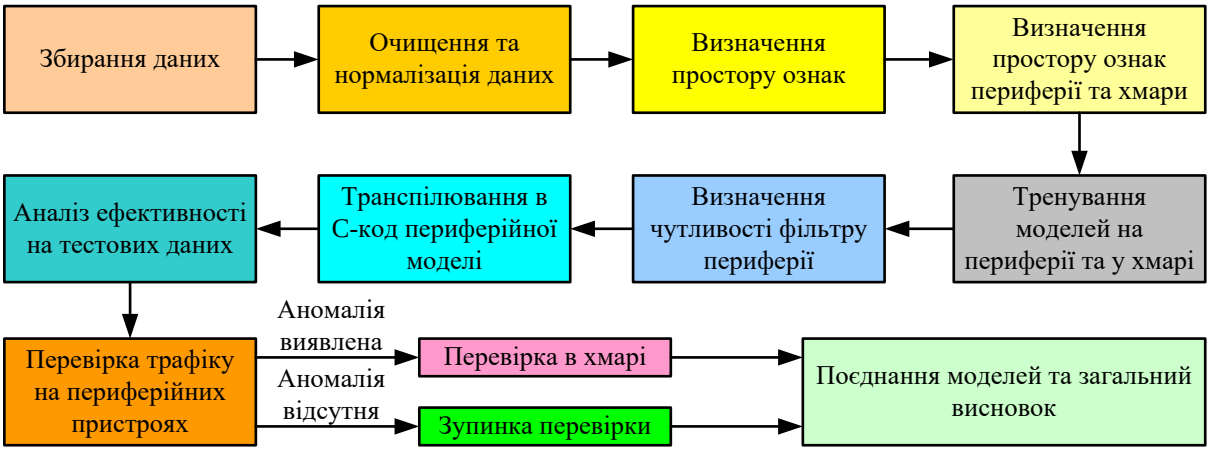



Рис. 1. Блок-схема розділеної системи виявлення вторгнень до мережі IoT

Для дослідження ефективності запропонованого методу було проведено експериментальні дослідження. Під час експерименту була протестована мережа IoT на змодельованому трафіку високої інтенсивності з Edge-IIoTset. Система обробила 166 591 пакет за 0,54 с, досягнувши пропускної здатності понад 310 000 пакетів/с. Модель периферійної обробки з порогом 0,3904 фільтрувала 96,3% безпечного трафіку локально,

зменшуючи навантаження на канал, тоді як у хмару передавалося лише 3,7% підозрілих даних. У результаті було досягнуто зниження мережевих витрат майже на 23% без втрати ефективності виявлення загроз. Ефективність запропонованого методу підтверджена високими розрахунковими показниками. Загальна точність системи становила 99,4%, що свідчить про надійність обробки як звичайного трафіку, так і кібератак. Для основних класів загроз (DDoS, DoS, Botnet, Brute Force) досягнуто recall rate понад 99%, що підтверджує ефективність хмарної моделі після попередньої фільтрації на периферії.

Водночас, збалансована точність становить 91,1%, що свідчить про наявність структурного обмеження архітектури. Найбільш вразливим класом залишаються атаки на рівні додатків: для web-атак точність знижується (precision ≈ 0,93), а recall падає до 62,3%, що пов'язано з відсутністю глибокого аналізу корисного навантаження на рівні периферії. Таким чином, метод демонструє високу ефективність для масових та мережевих атак, але потребує вдосконалення для виявлення прихованих атак у трафіку додатків.

**Висновок**. У дослідженні пропонується нова архітектура виявлення вторгнень у середовищі Інтернету речей, яка поєднує периферійний та хмарний рівні для зменшення навантаження на мережу. Двоетапний конвеєр машинного навчання забезпечує баланс між обмеженими ресурсами пристроїв та точністю аналізу. Результати експериментів засвідчили, що периферійна модель ефективно фільтрує 96,3% легітимного трафіку, зменшуючи використання пропускної здатності та підтримуючи високу продуктивність, тоді як хмарна частина забезпечує високу точність виявлення аномалій (до 0,994). Водночас виявлено ключове обмеження – зниження видимості атак на рівні додатків через використання обмеженого набору функцій на периферії, що зменшує ефективність виявлення веб-атак до 62,3%. Це підтверджує існування компромісу між обмеженнями ресурсів та якістю аналізу. У зв'язку з цим подальші дослідження повинні бути спрямовані на впровадження легких механізмів глибокої перевірки пакетів для підвищення безпеки в розподілених системах IoT.

## References


1. Ferrag, M. A., Friha, O., Maglaras, D., Maglaras, L., Janicke, H.: Edge-IIoTset: A new comprehensive realistic cyber security dataset of IoT and IIoT applications. IEEE Access 10, 40281–40306 (2022). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3165809.
2. Herrero, R.C.: Fundamentals of IoT Communication Technologies. Springer, Cham (2022).
3. Aboubakar, M., Kellil, M., Roux, P.: A review of IoT network management: Current status and perspectives. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences 34(7), 4163–4176 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.03.006.
4. Hanes, D., Salgueiro, G., Grossetete, P., Barton, R., Henry, J.: IoT fundamentals: Networking technologies, protocols, and use cases for the IoT. Cisco Press, Indiana (2017).
5. Almudayni, Z., Soh, B., Samra, H., Li, A.: Energy inefficiency in IoT networks: Causes, impact, and a strategic framework for sustainable optimisation. Electronics 14(1), 159 (2025). https://doi.org/10.3390/electronics14010159.
6. Hussain, M. Z., Hanapi, Z. M.: Efficient secure routing mechanisms for the low-powered IoT network: A literature review. Electronics 12(3), 482 (2023). https://doi.org/10.3390/electronics12030482.
7. Khraisat, A., Gondal, I., Vamplew, P., Kamruzzaman, J.: Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges. Cybersecurity 2(1), 20 (2019). https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7.
8. Al-Garadi, M. A., Mohamed, A., Al-Ali, A. K., Du, X., Ali, I., Guizani, M.: A Survey of Machine and Deep Learning Methods for Internet of Things (IoT) Security. IEEE Communications Surveys & Tutorials 22(3), 1646–1685 (2020). https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2988293.
9. HaddadPajouh, H., Dehghantanha, A., Khayami, R., Choo, K. K. R.: A survey on internet of things security: Requirements, challenges, and solutions. Internet of Things 14, 100129 (2021). https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100129.
10. Shah, Z., Levula, A., Khurshid, K., Ahmed, J., Ullah, I., Singh, S. Routing protocols for mobile Internet of Things (IoT): A survey on challenges and solutions. Electronics 10(19), 2320 (2021). https://doi.org/10.3390/electronics10192320.
11. Liang, X., Kim, Y.: A survey on security attacks and solutions in the IoT network. In: 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), pp. 0853–0859. IEEE, NV, USA (2021). https://doi.org/10.1109/CCWC51732.2021.9376174.

# АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АТАК НА СУЧАСНІ СИСТЕМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ

**Чепинога А.В., Кожем'якін Д.О., Кожем'якін О.С.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Метою роботи є комплексний аналіз вразливостей web-камер та визначення найнебезпечніших векторів атак на системи відеоспостереження і хмарну інфраструктуру. Завдання дослідження охоплюють систематизацію вразливостей з урахуванням параметрів камер, протоколів передачі даних і механізмів аутентифікації, аналіз хмарних загроз, а також розробку практичних рекомендацій щодо захисту. Об'єктом дослідження є системи відеонагляду на основі web-камер, інтегровані з хмарними сервісами. Предмет – вразливості та вектори атак на зазначені системи. У роботі використано методи аналізу баз даних CVE та огляду профільних досліджень. За результатами встановлено, що найнебезпечнішими є атаки через типові облікові дані, пряму мережеву доступність пристроїв і незахищену взаємодію з хмарою. Запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів захисту, зокрема шифрування каналів зв'язку, регулярне оновлення мікропрограми та впровадження апаратного кореня довіри.

**Ключові слова**: web-камера, вразливість, атака, хмарний сервіс, метод нейтралізації

# ANALYSIS OF VULNERABILITIES AND ATTACKS ON MODERN VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

**Chepynoga A.V., Kozhemiakin D.O., Kozhemiakin O.S.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The aim of the study is a comprehensive analysis of web camera vulnerabilities and identification of the most dangerous attack vectors targeting video surveillance systems and cloud infrastructure. The research objectives include systematizing vulnerabilities with regard to camera parameters, data transmission protocols, and authentication mechanisms, analyzing cloud-related threats, and developing practical security recommendations. The object of the study is web camera-based video surveillance systems integrated with cloud services. The subject of the study comprises the vulnerabilities and attack vectors of these systems. The research employs methods of CVE database analysis and a review of domain-specific literature. The findings establish that the most critical threats include attacks exploiting default credentials, direct network exposure of devices, and unencrypted camera-to-cloud communication. A set of technical and organizational security measures is proposed, including communication channel encryption, regular firmware updates, and the implementation of a Hardware Root of Trust.

**Keywords:** web camera, vulnerability, attack, cloud service, neutralization method

**Вступ.** Системи відеонагляду на основі web-камер посідають важливе місце в сучасній інфраструктурі інформаційної безпеки підприємств, державних установ та приватних об'єктів. Фактично дані пристрої входять до інфраструктури розумних будинків, що в свою чергу переводить їх в категорію IoT. Поширення пристроїв Інтернету речей (IoT) і перехід до хмарних сервісів зберігання відеоданих суттєво розширили функціональні можливості таких систем, однак одночасно збільшили площу атаки для зловмисників. Програмне забезпечення IoT пристроїв нерідко містить шкідливий код або некоректно реалізовані механізми захисту, що робить камери привабливою ціллю для кіберзлочинців [1].

Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням кількості підключених до мережі камер та відомими масштабними атаками на відповідну інфраструктуру. Зокрема, ботнет Mirai у 2016 році продемонстрував, що слабкі облікові дані IP-камер можуть використовуватися для організації потужних DDoS-атак, трафік яких перевищує 600 Гбіт/с [2].

**Метою роботи** є комплексний аналіз вразливостей web-камер, визначення найнебезпечніших векторів атак на системи відеоспостереження та хмарну інфраструктуру, а також розробка рекомендацій щодо підвищення захищеності таких систем.

**Постановка задачі** полягає в: систематизації основних видів вразливостей web-камер з урахуванням технічних параметрів камер, протоколів передачі даних та механізмів аутентифікації користувача; аналізі векторів атак, пов'язаних з хмарними сервісами, зокрема реєстрацією незареєстрованих камер у хмарі, сценаріями атак на хмарні сервіси та

вразливостями архітектури хмарного сервісу; розробці практичних способів недопущення або усунення виявлених вразливостей.

**Вирішення проблеми**. Аналіз опублікованих баз даних вразливостей CVE та профільних досліджень дозволяє виділити кілька основних класів загроз для web-камер.

Першим і найпоширенішим класом є вразливості аутентифікації. Більшість бюджетних IP-камер постачаються з типовими обліковими даними, які виробники не примушують змінювати. Недостатньо захищена аутентифікація користувача в поєднанні з відсутністю блокування після декількох невдалих спроб входу створює умови для брутфорс-атак. Окремо слід виділити проблему зберігання облікових даних у відкритому вигляді в конфігураційних файлах пристрою.

Другим класом є вразливості протоколів передачі даних. Web-камери використовують різноманітні протоколи: HTTP/HTTPS для веб-інтерфейсу, RTSP (Real Time Streaming Protocol) для відеопотоків, ONVIF для управління пристроями. Якщо взаємодія камери з користувачем або взаємодія камери з хмарою відбувається без шифрування (наприклад, через звичайний HTTP або RTSP без TLS), зловмисник, що перебуває в тому самому мережевому сегменті, може перехопити потік та здійснити перенаправлення або підміну зображення через атаку «людина посередині» [3].

Третій клас становлять вразливості програмного забезпечення IoT пристроїв. Застаріла мікропрограма з відомими вразливостями, відсутність механізму автоматичного оновлення, використання відкритих бібліотек із некоректно виправленими CVE – все це є середовищем для впровадження шкідливого коду та подальшого зараження і закріплення коду в системі. Дослідники компанії Trend Micro задокументували приклади, коли атакуючі використовували вразливості переповнення буфера у стеку ONVIF-сервера для отримання root-доступу до пристрою [4].

Технічні параметри камер також впливають на захищеність системи. Наприклад, висока роздільна здатність камери вимагає більшої пропускної здатності, що підштовхує виробників до використання оптимізованих, але менш безпечних кодеків. Крім того, web-інтерфейс управління нерідко містить міжсайтові скриптові атаки (XSS) або CSRF-вразливості.

Сучасні системи відеонагляду інтегруються з хмарними сервісами для зберігання архівів, аналітики та дистанційного доступу. Архітектура хмарного сервісу при цьому нерідко передбачає автоматичну реєстрацію нових пристроїв без належної верифікації. Проблема такої реєстрації камер у хмарі полягає в тому, що зловмисник може зареєструвати в хмарній платформі підроблений пристрій або перехопити ідентифікатор легітимної камери та підмінити пристрій.

Серед сценаріїв атак на хмарні сервіси виділяють: несанкціонований доступ до API управління пристроями, впровадження шкідливих команд через незахищені кінцеві точки API, атаки на токени аутентифікації сесій. Зокрема, якщо взаємодія камери з хмарою відбувається через незашифрований MQTT або CoAP, зловмисник може перехопити управляючі команди та змінити налаштування [5].

Окремо слід розглянути проблему «білої» IP-адреси камери, тобто безпосередньої доступності пристрою з мережі Інтернет. Пошуковий рушій Shodan індексує мільйони відкритих камер у реальному часі; частина з них взагалі не вимагає аутентифікації. За даними дослідників, значна частка доступних у такий спосіб камер використовує мікропрограму з відомими вразливостями, датованими кількома роками тому [4].

Після успішної компрометації камери зловмисник, як правило, прагне забезпечити зараження і закріплення коду в системі. Для цього використовуються такі техніки: запис шкідливого коду у flash-пам'ять пристрою, модифікація скриптів автозапуску, встановлення прихованого backdoor-сервісу, що слухає нестандартний порт. Завдяки обмеженим ресурсам IoT-пристроїв традиційні антивірусні засоби неефективні, тому виявлення аномальної мережевої активності є основним методом детекції компрометації.

Враховуючи вищенаведене, рекомендується на рівні кожного окремого пристрою: негайно змінювати типові облікові дані після введення камери в експлуатацію; вмикати шифрування на рівні протоколів передачі даних (TLS/HTTPS, RTSPS); регулярно оновлювати мікропрограму; вимикати невикористовувані сервіси (Telnet, FTP); не

розміщувати камеру з «білою» IP-адресою безпосередньо в Інтернеті без захисту периметра (firewall, VPN).

На рівні хмарної інфраструктури необхідно впроваджувати суворий контроль реєстрації нових пристроїв з верифікацією апаратних ідентифікаторів, шифрувати канал взаємодії камери з хмарою, проводити регулярний аудит безпеки архітектури хмарного сервісу та використовувати механізми аномалії-виявлення для ранньої ідентифікації атак (табл.1).

Таблиця 1

**Класифікація вразливостей web-камер та методи їх нейтралізації**

| Тип вразливості | Опис | Метод нейтралізації |
|---|---|---|
| Слабка аутентифікація | Використання типових облікових даних; відсутність 2FA; передача паролів у відкритому вигляді | Примусова зміна паролів; впровадження багатофакторної аутентифікації |
| Незахищені протоколи передачі даних | Використання HTTP, RTSP без шифрування; відсутність TLS/SSL | Перехід на HTTPS, RTSPS; налаштування TLS 1.2/1.3 |
| Застаріле програмне забезпечення IoT пристроїв | Наявність невиправлених вразливостей у мікропрограмі; відсутність механізму оновлень | Регулярне оновлення мікропрограми; автоматичне патчування |
| Вразливості хмарних сервісів | Реєстрація незареєстрованих камер у хмарі; небезпечна архітектура хмарного сервісу | Сувора валідація пристроїв при реєстрації; шифрування каналу взаємодії камери з хмарою |
| «Біла» IP-адреса камери | Пряма доступність камери з мережі Інтернет без захисту | VPN, firewall, використання приватних адрес з NAT |

**Висновок.** У ході проведеного дослідження систематизовано основні види вразливостей web-камер: вразливості аутентифікації користувача та зберігання облікових даних, незахищені протоколи передачі даних, недоліки програмного забезпечення IoT пристроїв, а також проблеми, пов'язані з хмарними сервісами. Встановлено, що найбільш небезпечними векторами атак є: використання типових облікових даних, пряма доступність камери через публічну IP-адресу, незахищена взаємодія камери з хмарою, реєстрація незареєстрованих камер у хмарі та зараження і закріплення коду в системі через вразливості мікропрограми. Доведено, що комплексний підхід до захисту, який поєднує технічні засоби (шифрування, оновлення, сегментація мережі) та організаційні заходи (аудит, навчання персоналу), дозволяє суттєво знизити ризики компрометації систем відеонагляду. Перспективним напрямком є впровадження апаратного кореня довіри (Hardware Root of Trust) для верифікації пристроїв при взаємодії з хмарними платформами.

## Список використаних джерел


1. Costin A. Security of CCTV and Video Surveillance Systems: Threats, Vulnerabilities, Attacks, and Mitigations. A. Costin Proceedings of the 1st International ACM Workshop on the Engineering of Reliable, Robust, and Secure Embedded Software. 2016. P. 1-8. DOI: http://dx.doi.org/10.1145/2995289.2995290
2. Antonakakis M. et al. Understanding the Mirai Botnet / M. Antonakakis et al. Proceedings of the 26th USENIX Security Symposium. 2017. P. 1093-1110.
3. OWASP Internet of Things Project. IoT Attack Surface Areas. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://owasp.org/www-project-internet-of-things.
4. Badis Hammi, Sherali Zeadally, and Jamel Nebhen. Security Threats, Countermeasures, and Challenges of Digital Supply Chains. *ACM Comput. Surv.* 55, 14s, Article 316 (July 2023), 40 p. DOI: https://doi.org/10.1145/3588999
5. Qi Wang, Wajih Ul Hassan, Adam Bates, Carl Gunter. Fear and Logging in the Internet of Things. Network and Distributed Systems Security Symposium, 18-21 February 2018, San Diego, CA, USA. P. 1-15. DOI: http://dx.doi.org/10.14722/ndss.2018.23282

# MODELING OF OPERATIONAL MONITORING AND WATER QUALITY FORECASTING SYSTEM BASED ON THE INTERNET OF THINGS FOR AFFECTED TERRITORIES

**Aartvork F., Trunova O., Bilous I.**
Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine

**Abstract.** This study addresses the critical problem of real-time water quality monitoring in de-occupied and war-affected territories of Ukraine. Due to widespread infrastructure damage, traditional reactive control methods are insufficient, requiring a transition toward proactive forecasting.

A modular architecture for an intelligent monitoring system based on the Internet of Things (IoT) and edge computing technologies is proposed. The main focus is placed on the development and validation of a multivariate fuzzy time series model (FTS-MV) with a dynamic rule-weighting mechanism (Weighted-MVFTS). The model is optimized for deployment on resource-constrained microcontrollers such as ESP32, providing a balance between high validation accuracy ($R^2 = 0.9943$) and computational efficiency.

Validation was carried out in a Python environment using a benchmark dataset adapted to the hydrochemical profile of the Desna River basin. The results demonstrate the system's ability to maintain high performance with limited training data, providing an autonomous tool for environmental risk management in crisis zones.

**Keywords:** water quality, Internet of Things (IoT), fuzzy time series (FTS), forecasting, real-time environmental monitoring, ESP32 microcontroller.

**Introduction.** Large-scale damage to water supply systems in de-occupied territories of Ukraine has led to a critical increase in the risks of technogenic contamination. Traditional laboratory methods are characterized by significant inertia, making rapid response to sudden pollutant discharges impossible. Although IoT solutions enable automated data collection, most of them focus on passive state monitoring and do not provide tools for proactive forecasting. This study is aimed at the development of an adaptive predictive system for edge devices operating in crisis zones [1].

**The purpose of the work.** The aim of this study is to develop and validate a predictive model of multivariate fuzzy time series (FTS-MV) for real-time water quality monitoring in affected territories.

**Formulation of the problem.** Modern deep learning models (LSTM, CNN) require large volumes of historical data and considerable computational power, which complicates their deployment on autonomous microcontrollers such as ESP32. Therefore, there is a need for a computationally efficient mathematical framework capable of maintaining stability on small datasets while preserving high forecasting precision [2].

**Solving the problem.** The transformation of raw sensor signals into predictive values is implemented through a six-phase architecture (Fig. 1) based on the concept of a soft sensor.

The data processing pipeline includes the following stages:

1. *Sensor Data Acquisition (INPUT).* Discrete sampling of signals from 9 sensors (pH, turbidity, temperature, $Cl_2$, DO, Fe, Mn, TDS, conductivity) at 15-*minute* intervals to form a multivariate time series.

2. *Data Preprocessing.* Data cleaning using a median filter (window size $m = 5$) and normalization to the range [0, 1]. To reduce dimensionality, an independent basis of three parameters (conductivity, DO, pH) was selected, allowing redundant factors to be excluded without loss of informativeness.

3. *Fuzzification.* Partitioning the universe of discourse of each variable into 20 intervals (Grid Partitioning) and defining triangular membership functions to represent linguistic terms.

4. *Training Phase (Weighted Rule Discovery).* Construction of a knowledge base consisting of production rules of the "IF–THEN" type. Each rule is assigned a statistical weight $w_i$, reflecting its confidence level based on historical data, which minimizes the influence of random noise.

5. *Forecasting Phase.* Computation of the future system state through aggregation of conclusions from activated rules. The predicted value is determined as a weighted sum of the centroids of the output fuzzy sets.

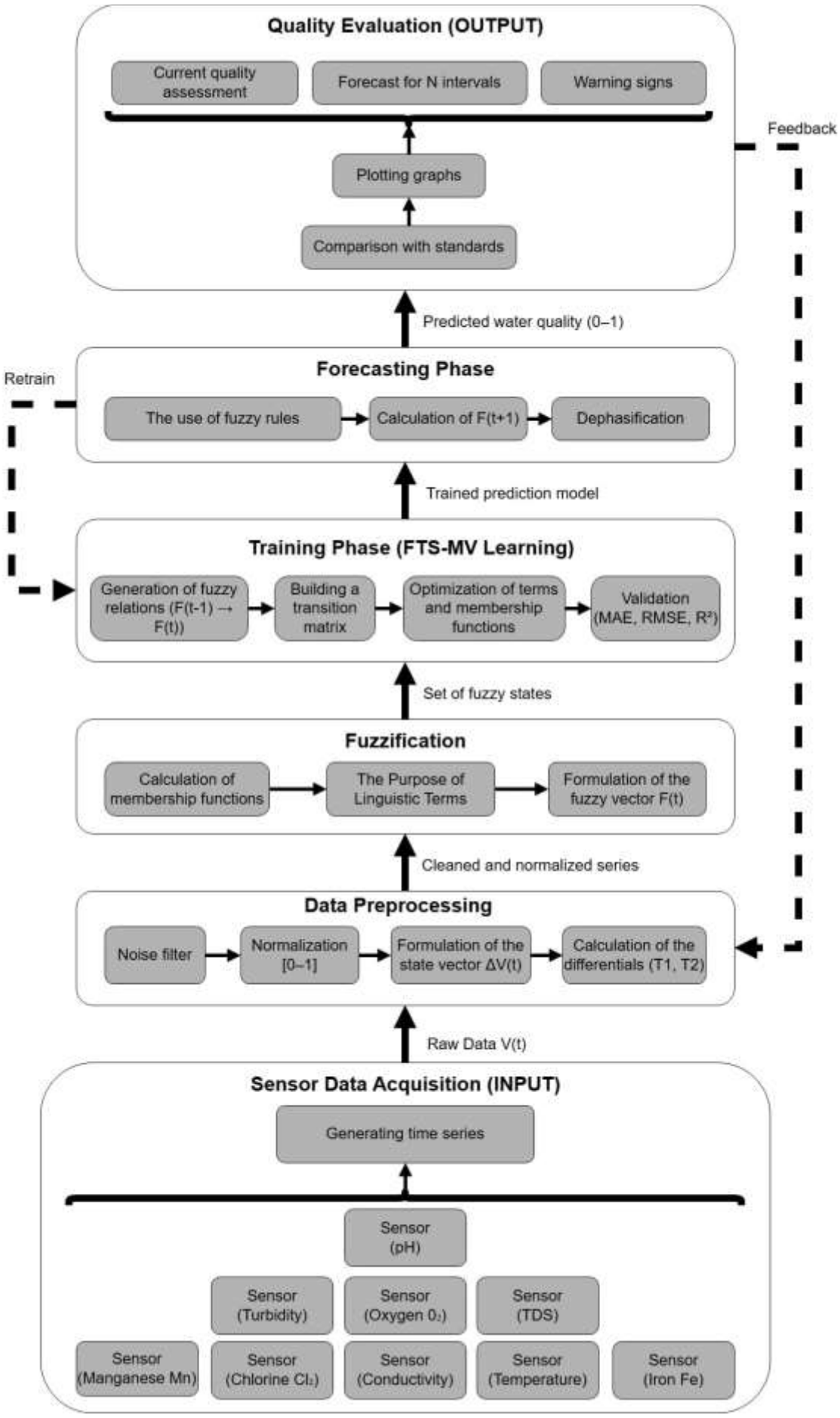



Fig. 1. General architecture of the data processing pipeline of the intelligent monitoring system

6. *Quality Evaluation (OUTPUT).* Water quality classification (Poor, Fair, Good) according to sanitary standards and detection of anomalous regimes through analysis of the 95% confidence interval.

For model validation, a benchmark dataset configured according to the Environmental Passport of Chernihiv Oblast [3] was used. Considering the regional specificity of the Desna River basin (high background concentrations of iron and manganese), a Feature Selection procedure was performed. Based on the analysis of the correlation matrix of nine factors, critical redundancy was identified in the Cond/TDS ($r = 0.98$) and *T*/DO ($r = -0.85$) pairs, which made it possible to form an independent basis of three parameters: conductivity (Cond), dissolved oxygen (DO), and pH, without loss of predictive accuracy. The comparative forecasting performance of different mathematical models is presented in Table 1.

Table 1

**Comparative evaluation of forecasting accuracy for water quality indicators using different mathematical models**

| **Model** | MAE | RMSE | $R^2$ | Length |
|---|---|---|---|---|
| Weighted-MVFTS | 0.1328 | 0.1927 | 0.9943 | 5969 |
| MVFTS | 0.1569 | 0.2621 | 0.9895 | 5969 |
| LSTM | 0.1763 | 0.9073 | 0.8740 | 5969 |
| Clustered-MVFTS | 0.1835 | 0.2967 | 0.8086 | 5969 |
| ARIMA | 1.8581 | 2.5736 | −0.0134 | 5969 |
| Linear Regression | 1.9205 | 2.7491 | −0.1563 | 5969 |

The Weighted-MVFTS model demonstrated the best predictive performance. It effectively solves the approximation problem for nonlinear processes, where classical methods such as ARIMA prove unsuitable. At the same time, unlike LSTM neural networks, the Weighted-MVFTS model preserves the ability to detect short-term anomalies, preventing their averaging and masking.

**Conclusion.** A comprehensive model combining a distributed architecture with the Weighted-MVFTS framework is proposed. It was demonstrated that the use of fuzzy logic provides a rational balance between forecasting precision and low computational complexity (10–12 *ms* per cycle). This enables autonomous real-time monitoring based on ESP32 without mandatory cloud connectivity. A priority direction for future research is the implementation of incremental learning to adapt the system to technogenic anomalies in real time.

## References


1. Aartvork, F., & Trunova, O. (2025). Designing a software platform for operational monitoring of water resources. *Technical Sciences and Technologies*, 3(41), 296–309.
2. Lucas, P. O. et al. (2021). A tutorial on fuzzy time series forecasting models. *Learning and Nonlinear Models*, 19(2), 29–50.
3. Department of Ecology and Natural Resources of the Chernihiv Regional State Administration (2024). *Ecological Passport of the Chernihiv Region* 2024.

# MACHINE LEARNING FORECASTING OF S&P 500 DIRECTION USING ROUGHNESS AND HURST COMPLEXITY FEATURES

**Bielinskyi A.[1,2], Soloviev V.[1,3], Matviychuk A.[1], Solovieva V.[2]**
[1]Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine
[2]State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine
[3]South Ukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, Odesa, Ukraine

**Abstract.** The study investigates whether complexity measures calculated from daily S&P 500 closing values can improve short-horizon classification of market direction. Daily observations from 1980-01-01 to 2026-05-10 were transformed into rolling-window indicators of relative roughness, the classical Hurst exponent estimated by R/S analysis, and a generalized Hurst-type scaling exponent obtained by detrended fluctuation analysis. The indicators were computed with sliding windows of 50, 75, and 100 trading days. For each indicator, lagged values for the previous 30 days were formed and used as candidate predictors. The target variable was the sign of the future S&P 500 movement for 14-day and 21-day horizons. Mutual information was used to keep the most informative 20% of features, after which six classifiers were trained and compared: random forest, logistic classifier, ridge classifier, stochastic gradient descent classifier, Gaussian process classifier, and $k$-nearest neighbors. The results show stable above-random classification ability. Random forest achieved the highest ROC-AUC for both horizons, reaching 0.7207 for 14 days and 0.7656 for 21 days. The findings indicate that roughness and Hurst-based features contain useful information about medium-term market direction, especially for the longer forecast horizon.

**Keywords:** S&P 500, machine learning, time series classification, relative roughness, Hurst exponent, detrended fluctuation analysis, mutual information, sliding window procedure.

**Introduction.** Forecasting the direction of stock index movement remains one of the central empirical problems of financial econometrics and data-driven market analysis. According to the efficient market view, publicly available price information should be rapidly incorporated into market prices, making systematic prediction difficult [1]. At the same time, financial time series are not purely regular signals. They combine trend episodes, local persistence, volatility clustering, abrupt corrections, and crisis regimes. This makes the forecasting problem suitable for methods that describe changes in the internal complexity of price dynamics rather than using only raw returns.

The S&P 500 index is a widely used benchmark of the United States equity market. Its long historical record allows researchers to examine whether complexity measures calculated on moving time windows can reveal temporary changes in market behavior. In this work, the daily values of the S&P 500 for the period from 1980-01-01 to 2026-05-10 are used as the basis for machine learning classification of future market direction. The methodological focus is on roughness and Hurst-type indicators, because they reflect local irregularity, persistence, and scaling properties of the price path.

Recent complexity-science studies strengthen this motivation. Vogl analyzed rolling Hurst exponent dynamics of S&P 500 returns and connected long memory, multifractality, and crisis predictability [2]. Zhang and Fang showed that multifractal Hurst features can improve index forecasting during volatility-clustering periods [3]. Gomez-Aguila, Trinidad-Segovia, and Sanchez-Granero emphasized that Hurst estimates in financial markets require careful validation of self-similarity and estimator robustness [4], while Brouty and Garcin linked Hurst scaling with entropy-based market information [5]. Recurrence-network research has also used nonlinear complexity indicators as early-warning signals for stock market crashes [6]. Recent comparative studies further suggest that machine learning performance should be interpreted together with market efficiency and fractal indicators [7, 8].

**The purpose of the study.** The goal of the work is to evaluate whether sliding-window roughness and Hurst complexity features can be used to forecast the future direction of the S&P 500 index at 14-day and 21-day horizons. The object of the research is the daily S&P 500 price series, and the subject is the predictive information contained in complexity indicators derived from this series. The practical purpose is to construct a compact feature set for binary time series classification and to compare several machine learning algorithms by their ability to distinguish future upward and downward movements.

**Problem Statement.** Let the available daily S&P 500 values form an ordered time series. For each current date, the target class is defined by the direction of the index movement after a fixed forward horizon. If the future value is higher than the current value, the observation is assigned to the upward class; otherwise, it is assigned to the downward class. Two horizons are considered: 14 days and 21 days. The main research question is whether features constructed from past complexity dynamics improve discrimination between these two classes.

The feature construction problem has three stages. First, the initial price series is transformed into several complexity indicators. Second, lagged versions of these indicators are formed so that the classifier receives information about the recent evolution of market complexity. Third, redundant variables are reduced using mutual information, which estimates the dependence between each candidate feature and the classification target [9].

**Main Part.** Three groups of complexity indicators are used. Relative roughness characterizes the irregularity of the local price trajectory. The classical Hurst exponent is calculated by rescaled range, or R/S, analysis, which was introduced for measuring long-term dependence in natural time series [10]. A generalized Hurst-type scaling indicator is obtained using detrended fluctuation analysis, which is suitable for identifying scaling behavior in nonstationary data [11]. These indicators describe different but related properties of the same price path: roughness reflects local variability, while Hurst-based measures reflect persistence or antipersistence over time.

All complexity indicators are computed by a sliding-window procedure with window lengths of 50, 75, and 100 trading days. This makes it possible to observe the evolution of market complexity at several temporal scales. For each generated indicator, lagged features for the previous 30 days are created. The resulting feature space, therefore, contains information not only about the current value of each complexity measure but also about its short recent trajectory. This design follows the recent view that Hurst and multifractal quantities are best treated as dynamic regime descriptors, not as fixed characteristics of a whole market history [2-4].

Because the full lagged feature set can be redundant, feature selection is performed before model estimation. Mutual information is calculated between each candidate predictor and the target class, and the top 20% of the most informative features are retained. This step reduces dimensionality and limits overfitting while preserving the variables most closely associated with future direction. The selected features are then supplied to six classifiers: RandomForestClassifier, LogisticClassifier, RidgeClassifier, SGDClassifier, GaussianProcessClassifier, and KNeighborsClassifier. Random forest is included because ensemble trees can capture nonlinear feature interactions [12], while the linear and kernel-based classifiers provide useful benchmarks implemented in standard machine learning practice [13]. Classification quality is evaluated by the area under the receiver operating characteristic curve, or ROC-AUC. This metric is suitable for binary direction forecasting because it measures the ability of a model to rank upward and downward cases across classification thresholds. The obtained results are summarized in Table 1.

Table 1

**ROC-AUC results of S&P 500 direction classification**

| Forecast horizon | Best model | Best ROC-AUC | Other model results |
|---|---|---|---|
| 14 days | RandomForestClassifier | 0.7207 | Logistic 0.7143; Ridge 0.7139; Gaussian process 0.7137; SGD 0.7061; $k$-NN 0.6789 |
| 21 days | RandomForestClassifier | 0.7656 | Logistic 0.7639; SGD 0.7636; Ridge 0.7623; Gaussian process 0.7072; $k$-NN 0.6933 |

The strongest model for both horizons is RandomForestClassifier. For the 14-day horizon it reaches ROC-AUC = 0.7207, followed closely by LogisticClassifier, RidgeClassifier, GaussianProcessClassifier, and SGDClassifier. KNeighborsClassifier shows the weakest performance, with ROC-AUC = 0.6789. This suggests that the selected roughness and Hurst features provide useful but moderate short-horizon directional information, while local distance-based classification is less effective for this feature geometry.

For the 21-day horizon the overall classification quality improves. RandomForestClassifier reaches ROC-AUC = 0.7656, while LogisticClassifier, SGDClassifier, and RidgeClassifier remain very close to the best result. The higher AUC values at the 21-day horizon indicate that the complexity indicators may be more informative for medium-term movement than for the shorter 14-day direction. The close performance of several algorithms also shows that the signal is not fully model-specific; rather, it is present in the selected feature set itself.

**Conclusions**. The results support the usefulness of roughness and Hurst-based complexity measures for machine learning classification of S&P 500 direction. Sliding windows of 50, 75, and 100 days allow the model to represent several market-memory scales, while 30-day lagged features describe recent changes in complexity. Mutual information selection reduces the feature set to the most relevant 20% and helps keep the classification problem compact.

Empirically, the best ROC-AUC values are above random classification for both horizons. The best 14-day result is 0.7207, and the best 21-day result is 0.7656. The 21-day horizon is more predictable in the conducted experiment, which may indicate that roughness and scaling properties contain stronger information about medium-term market regimes than about very short-term fluctuations. In line with recent complexity-science literature, these indicators should be interpreted as data-driven regime descriptors rather than deterministic proof of market inefficiency. Further research should compare these features with conventional technical indicators, test additional equity indices, analyze economic value after transaction costs, and evaluate the stability of the selected features across crisis and non-crisis periods.

## References


1. Fama, E.F.: Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. The Journal of Finance, 25(2), pp. 383–417, (1970). https://doi.org/10.2307/2325486
2. Vogl, M.: Hurst exponent dynamics of S&P 500 returns: Implications for market efficiency, long memory, multifractality and financial crises predictability by application of a nonlinear dynamics analysis framework. Chaos, Solitons & Fractals, 166, Article 112884, (2023). https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112884
3. Zhang, S., Fang, W.: Multifractal behaviors of stock indices and their ability to improve forecasting in a volatility clustering period. Entropy, 23(8), Article 1018, (2021). https://doi.org/10.3390/e23081018
4. Gomez-Aguila, A., Trinidad-Segovia, J.E., Sanchez-Granero, M.A.: Improvement in Hurst exponent estimation and its application to financial markets. Financial Innovation, 8, Article 86, (2022). https://doi.org/10.1186/s40854-022-00394-x
5. Brouty, X., Garcin, M.: Fractal properties, information theory, and market efficiency. Chaos, Solitons & Fractals, 180, Article 114543, (2024). https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114543
6. Song, S., Li, H.: Early warning signals for stock market crashes: empirical and analytical insights utilizing nonlinear methods. EPJ Data Science, 13, Article 16, (2024). https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-024-00457-2
7. Bustos, O., Pomares-Quimbaya, A., Stellian, R.: Machine learning, stock market forecasting, and market efficiency: a comparative study. International Journal of Data Science and Analytics, 20, pp. 6815–6839, (2025). https://doi.org/10.1007/s41060-025-00854-4
8. Pernagallo, G.: Random walks, Hurst exponent, and market efficiency. Quality & Quantity, 59(Suppl. 2), pp. 1097–1119, (2025). https://doi.org/10.1007/s11135-025-02052-7
9. Kraskov, A., Stögbauer, H., Grassberger, P.: Estimating mutual information. Physical Review E, 69, Article 066138, (2004). https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066138
10. Hurst, H.E.: Long-term storage capacity of reservoirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 116, pp. 770–799, (1951).
11. Peng, C.-K., Buldyrev, S.V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H.E., Goldberger, A.L.: Mosaic organization of DNA nucleotides. Physical Review E, 49(2), pp. 1685–1689, (1994). https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685
12. Breiman, L.: Random forests. Machine Learning, 45, pp. 5–32, (2001). https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
13. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E.: Scikit-learn: Machine learning in Python. Journal of Machine Learning Research, 12, pp. 2825–2830, (2011).

# ADAPTIVE IOT-BASED DIGITAL TWIN FOR REAL-TIME CASUALTY MONITORING AND TRIAGE

**Bronin S.[1], Kravchenko O.[2,3], Sipko O.[2], Karapetyan A.[4], Stepanov M.[3,2]**
[1]Vilnius University, Kaunas, Lithuania
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[3]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
[4]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This paper proposes an adaptive approach to casualty monitoring based on the integration of the Internet of Things and the Digital Twin for emergency environments. The system enables automated acquisition of physiological parameters using wearable sensors immediately after casualty evacuation and supports real-time data processing. A digital twin model is introduced to represent the dynamic state of each patient, incorporating an integral risk assessment mechanism based on normalized deviations of vital signs. An adaptive monitoring strategy is developed to adjust data acquisition frequency according to the estimated risk level, ensuring efficient resource utilization. Additionally, a triage prioritization method is proposed based on risk evaluation and contextual parameters. Experimental results demonstrate improved responsiveness in detecting critical conditions and enhanced efficiency of resource allocation compared to conventional monitoring approaches.

**Keywords**: Digital Twin, IoT-based monitoring, adaptive data acquisition, real-time health monitoring, casualty triage, predictive risk modeling, emergency response systems, decision support.

**Introduction**. The relevance of developing an adaptive casualty monitoring system based on the Internet of Things and Digital Twin is driven by the need for rapid and continuous monitoring of vital signs in emergency situations, such as terrorist attacks, large-scale disasters, and military conflicts, where the number of casualties often exceeds available medical resources. This significantly complicates timely triage and decision-making processes. Recent studies demonstrate that wearable IoT devices enable continuous acquisition of physiological data (heart rate, $SpO_2$, blood pressure, body temperature), allowing early detection of critical conditions [1]. However, conventional monitoring systems typically do not account for the dynamic evolution of a patient's condition, which limits their effectiveness. Therefore, the application of adaptive models that adjust data acquisition strategies based on risk levels is of particular importance [2]. The integration of IoT with digital twin technology enables the creation of a dynamic virtual representation of a casualty, reflecting current physiological state, historical data, and predicted condition progression. Studies indicate that such approaches improve the accuracy of risk assessment and enhance decision-making efficiency in emergency medical systems [3]. Furthermore, advancements in the Internet of Medical Things, edge computing, and AI-driven data analytics facilitate the development of intelligent monitoring systems and triage support mechanisms [4-5]. Thus, the proposed research is highly relevant due to the integration of medical needs with advanced IT technologies, enabling improved response efficiency and optimized resource allocation in time-critical scenarios.

**The purpose of the work** is to develop an adaptive IoT-based digital twin model for real-time casualty monitoring with integrated risk assessment and support for medical triage.

**Formulation of the problem**. Existing casualty monitoring systems lack real-time adaptive control and fail to integrate Internet of Things (IoT) with Digital Twin models, resulting in limited risk assessment accuracy and delayed triage decision-making in emergency scenario.

**Solving the problem**. The proposed approach involves the development of an adaptive casualty monitoring system based on IoT and Digital Twin technologies, in which the state of each casualty is represented by a vector of physiological parameters:

$$X_i(t) = \{HR_i(t), SpO_{2i}(t), BP_i(t), T_i(t), RR_i(t)\}, \quad (1)$$

where $HR_i(t)$ denotes heart rate, $SpO_{2i}(t)$ oxygen saturation, $BP_i(t)$ blood pressure, $T_i(t)$ body temperature, $RR_i(t)$ respiratory rate, i is the casualty identifier, and t is time.

The digital twin of a casualty is defined as a dynamic model:

$$DT_i(t) = \{X_i(t), H_i(t), R_i(t), S_i(t)\}, \quad (2)$$

where $H_i(t)$ represents the history of physiological changes, $R_i(t)$ the integral risk level, and $S_i(t)$ the current status or triage category.

The integral risk indicator is defined as a weighted function of deviations of physiological parameters from their normal ranges:

$$R_i(t) = \sum_{k=1}^{n} \omega_k \cdot \Delta x_{ik}(t), \quad (3)$$

where $\omega_k$ is the weight coefficient of the k-th parameter, and $\Delta x_{ik}(t)$ is the normalized deviation from the clinically acceptable range.

The normalized deviation is computed as:

$$\Delta x_{ik}(t) = \frac{|x_{ik}(t) - x_k^{norm}|}{|x_k^{max} - x_k^{min}|}, \quad (4)$$

where $x_k^{norm}$ is the nominal value, and $x_k^{min}$, $x_k^{max}$ are the minimum and maximum allowable limits.

The adaptive monitoring frequency is defined as:

$$f_i(t) = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot R_i(t), \quad (5)$$

where $f_i(t)$ is the data acquisition frequency, and $f_{min}$, $f_{max}$ are its bounds.

The triage category is determined as:

$$S_i(t) = \begin{cases} \text{Critical}, R_i(t) \geq \theta_3 \\ \text{Serious}, \theta_2 \leq R_i(t) \leq \theta_3 \\ \text{Stable}, \theta_1 \leq R_i(t) \leq \theta_2 \\ \text{Minor}, R_i(t) \leq \theta_1 \end{cases}, \quad (6)$$

where $\theta_1$ , $\theta_2$, $\theta_3$ are threshold values.

The priority function for medical response is defined as:

$$P_i(t) = \alpha \cdot R_i(t) + \beta \cdot D_i(t) + \gamma \cdot W(t), \quad (7)$$

where $P_i(t)$ is the priority level, $D_i(t)$ is the distance to the medical facility, $W(t)$ is the waiting time, and $\alpha, \beta, \gamma$ are weighting coefficients.

In this formulation, the system not only captures the current state of a casualty but also forms an adaptive digital model that supports triage, risk prediction, and prioritization of medical assistance under resource-constrained conditions.

Table 1 summarizes the relationship between casualties' physiological parameters, the integral risk level, triage category, adaptive monitoring frequency, and the corresponding system decisions for prioritizing medical assistance.

Table 1

**Casualty Monitoring Scenarios**

| No. | Vital Signs (HR, $SpO_2$, BP, T, RR) | Risk (R_i(t)) | Category (S_i(t)) | Monitoring Frequency (f_i(t)) | Priority (P_i(t)) | System Decision |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 78 bpm, 98%, 120/80, 36.6°C, 16 | 0.15 | Minor | (f_{min}) | 0.20 | Observation, low priority |
| 2 | 95 bpm, 94%, 110/70, 37.2°C, 20 | 0.35 | Stable | medium | 0.40 | Scheduled examination |
| 3 | 110 bpm, 90%, 100/65, 37.8°C, 24 | 0.55 | Serious | ↑ | 0.65 | Priority monitoring |
| 4 | 130 bpm, 88%, 90/60, 36.0°C, 28 | 0.78 | Critical | (f_{max}) | 0.85 | Immediate intervention |
| 5 | 145 bpm, 82%, 80/50, 35.5°C, 32 | 0.92 | Critical | (f_{max}) | 0.95 | Emergency evacuation |

Fig. 1 shows a 3D risk surface illustrating the dependence of the risk level $R(t)$ on heart rate (HR) and oxygen saturation ($SpO_2$). The risk increases with elevated HR and decreased $SpO_2$, reflecting the combined impact of physiological deviations on the patient's condition.

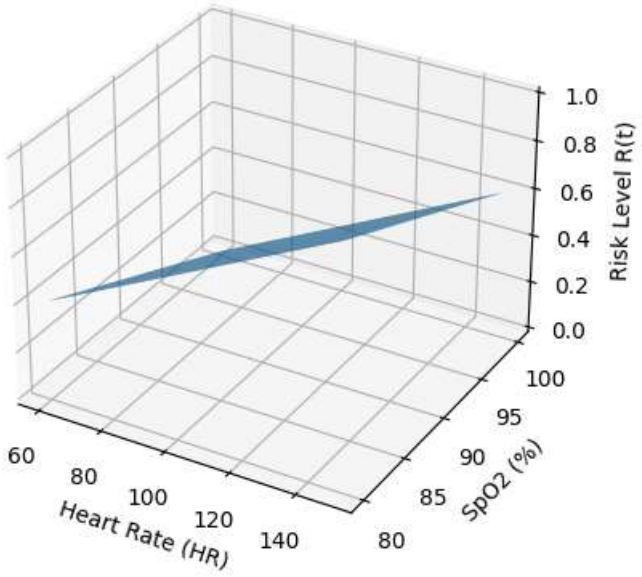



Fig. 1. 3D plot of risk level dependence on HR and $SpO_2$

**Conclusion**. The proposed approach enables real-time casualty monitoring through adaptive risk assessment based on physiological data. The model links vital signs to risk levels, triage decisions, and monitoring frequency. The 3D risk surface demonstrates that risk increases with heart rate (60-150 bpm) and decreases with oxygen saturation (80-100%), confirming the sensitivity of the model to critical physiological changes. Overall, the results validate improved detection of critical conditions and more efficient resource allocation in emergency scenarios.

## References


1. Gathright, R.; Mejia, I.; Gonzalez, J.M.; Hernandez Torres, S.I.; Berard, D.; Snider, E.J. Overview of Wearable Healthcare Devices for Clinical Decision Support in the Prehospital Setting. Sensors 2024, 24, 8204. doi: 10.3390/s24248204.
2. Caviglia M. Bridging Data Gaps in Emergency Care: The NIGHTINGALE Project and the Future of AI in Mass Casualty Management. Journal Med Internet Research, Vol.27 (2025) URL: https://www.jmir.org/2025/1/e67318 doi: 10.2196/67318.
3. Liu Y, Wan Y, Li C, Guan G, Wang F, Gao J, Wang L. Gradient scaffolds in bone-soft tissue interface engineering: Structural characteristics, fabrication techniques, and emerging trends. Journal Orthop Translat. 2025 Jan 28; 50:333-353. doi: 10.1016/j.jot.2024.10.015.
4. Tao F., Zhang H., Liu A., and Nee A.Y.C. Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 4, pp. 2405-2415, 2019, URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8935092/mod_resource/content/1/Digital_Twin_in_Industry_State-of-the-Art.pdf.
5. Islam S.M.R., Kwak D., Humaun Kabir M., Hossain M., and Kwak K.-S. The Internet of Things for health care: A comprehensive survey. IEEE Access, vol. 3, pp. 678-708, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2437951.

# INTEGRATED APPROACHES TO OPTIMIZE THE OPERATION OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX OF THE NUCLEAR POWER PLANT

**Brovko K., Budanov P., Oliinyk Yu., Vasiuchenko P., Vynokurova N.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. The paper examines approaches to processing information on technological process parameters in the information and control systems of software and hardware complexes of automated process control systems for nuclear power plant power units. An analysis of modern methods of information processing for monitoring, control and management of technological parameters was carried out. Traditional approaches based on PID regulators and analog-digital converters, their advantages, disadvantages and specifics of application were studied. It is proposed to use quantum computing, in particular Grover's algorithm, to optimize the search for emergency states. Analytical expressions of the algorithm's operating model are given. The results show that the application of Grover's algorithm significantly reduces the number of iterations to identify the emergency state compared to classical methods, which increases the speed and accuracy of systems in real time.

**Keywords**: Information and control system, Grover's algorithm, Quantum calculations, Emergency monitoring, Real-time mode.

**Introduction**. Nuclear power plants (NPPs) are critical energy infrastructure facilities, the efficiency and safety of which depend on modern software and technical complexes (PTK) of automated control systems (ACS) of the technological process (TP). The development of information and control systems of PTK ACS TP power units of NPPs takes place through the introduction of fractal-cluster approaches, quantum computing, digital twins and quantum cryptography [13]. This provides monitoring, forecasting, optimization of operating modes, increased reliability and protection against cyber threats.

**The purpose of the work** is to improve approaches to optimize the operation of information and control systems of PTK ACS TP power units of NPPs based on the use of quantum calculations, in particular, Grover's algorithm, to ensure quick and accurate detection of emergency conditions and increase the overall reliability of the system's functioning.

**Formulation of the problem**. Modern power units of nuclear power plants operate in the conditions of processing large volumes of data in real time, which places increased requirements on the information and control systems of PTK ACS TP. Traditional approaches, including PID controllers, A/D converters, and digital filtering, do not always provide the required response speed and accuracy when detecting emergency conditions. As the number of controlled parameters increases, it becomes difficult to find critical deviations among a large number of possible combinations. This necessitates the development of new methods, in particular with the use of quantum computing and Grover's algorithm, to increase the reliability, speed and safety of managing NPP technological processes.

**Solving the problem**. To solve the problem, an integrated approach to optimizing the operation of information and control systems of PTC ACS TP power units of NPPs is proposed, which combines traditional data processing tools with the capabilities of quantum computing. In the central node of the PTK ACS TP (SCADA system or server), data processing from sensors is performed sequentially in three stages: checking the integrity of the transmitted packets, identifying the signal source, and comparing the received parameters with permissible settings. If the limit values are exceeded, an emergency signal is generated, and the corresponding protection scenarios are triggered (Fig. 1) [4].

At the first level of the proposed structure, traditional monitoring and regulation tools are used, including PID controllers, analog-to-digital converters, digital filtering and primary data processing algorithms. They ensure the stabilization of the main parameters of the technological process and form an array of data for further intelligent analysis [5]. However, traditional approaches based on sequential analysis of data arrays and classical full search algorithms, with an

increase in the number of possible system states, demonstrate a significant increase in computational complexity, which can negatively affect the speed of the security system [6].

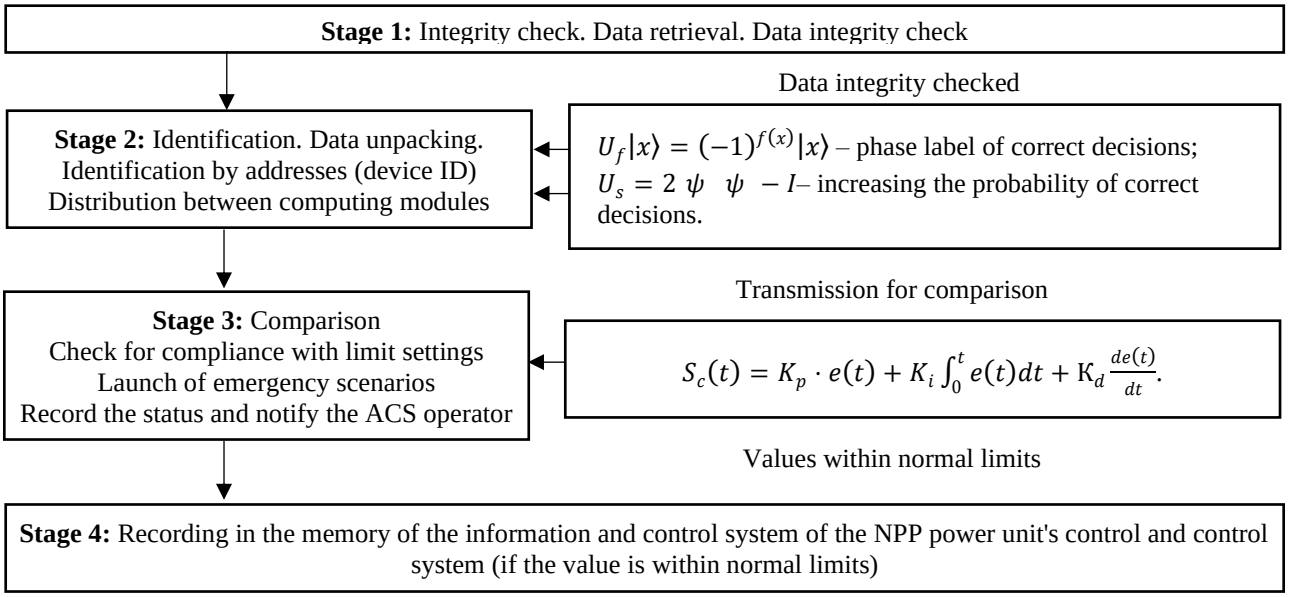



Fig. 1. Structure diagram of the sequence of stages of parallel data processing in the central node of the microprocessor

In this regard, the second level proposes the use of quantum algorithms, in particular Grover's algorithm [7], which provides a quadratic acceleration of the search for target states in a disordered data space. The methodological basis of the proposed approach is the representation of a set of possible states of the technological process in the form of a quantum space, where each state is described by a certain combination of the main parameters of the first circuit of the reactor installation, in particular the coolant temperature *T*, pressure *P*, water level *L* and neutron flux *R*. Each such combination forms a basis state |x⟩, and the initial state of the quantum system is given by a uniform superposition of all possible variants (1):

$$|I_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} |x\rangle, \quad (1)$$

where *N* – the total number of possible states of the technological process.

From a scientific and applied point of view, this formulation of the problem allows us to interpret the diagnostic process as a simultaneous parallel analysis of the entire space of possible modes of operation of the NPP power unit. This fundamentally distinguishes the quantum approach from classical algorithms, in which state checking is performed sequentially.

The next step implements the oracle operator, which performs the marking of emergency states by changing the phase of the corresponding amplitudes. Mathematically, this is described by an expression (2):

$$Q|x\rangle = \begin{cases} -|x\rangle, if\ x = x_{es} \\ |x\rangle, otherwise \end{cases}, \quad (2)$$

where $x_{es}$ corresponds to the emergency or pre-emergency state of the system.

In the context of the functioning of the information and control systems of PTK ACS TP, this means the formalization of a set of critical regimes based on the permissible technological limits of operation. In particular, states in which the temperature exceeds the regulatory range, the pressure reaches critical values or a dangerous decrease in the coolant level is considered emergency.

After marking the target states, a diffusion operator is applied (3):

$$D = 2|I_0\rangle\langle I_0| - I_{const}, \quad (3)$$

where $|I_0\rangle$ – the initial superposition of all possible combinations of process parameters, such as coolant temperature, pipeline pressure, reactor water level, etc; $N$ – the total number of possible states in the system describing all combinations of parameters; $\langle I_0|$ – a transposed and complex-

conjugate representation of the initial superposition used for unitary transformation of state amplitudes; $I_{const}$ – a unit operator that leaves the state unchanged (that is, does not change the amplitude of the states).

Multiple repetition of a pair of operators «oracle + diffusion» forms an iterative process of Grover's algorithm, the optimal number of repetitions of which is determined by the ratio (4):

$$k = \left\lfloor \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{N}{M}} \right\rfloor, \quad (4)$$

where $M$ – number of emergency conditions. It is this dependence that is the key theoretical result, as it demonstrates the quadratic acceleration of the search compared to the classical approach.

To confirm the practical feasibility of the proposed methodology, the dynamics of the technological parameters of the first circuit of the reactor installation were analyzed. The corresponding nature of their change over time is presented in Fig. 1. As can be seen from the above data, during the initial observation period, the system functions within the regulatory regime. At the same time, after the 50th second, a tendency to decrease the temperature of the coolant, increase the pressure and decrease the water level is recorded.

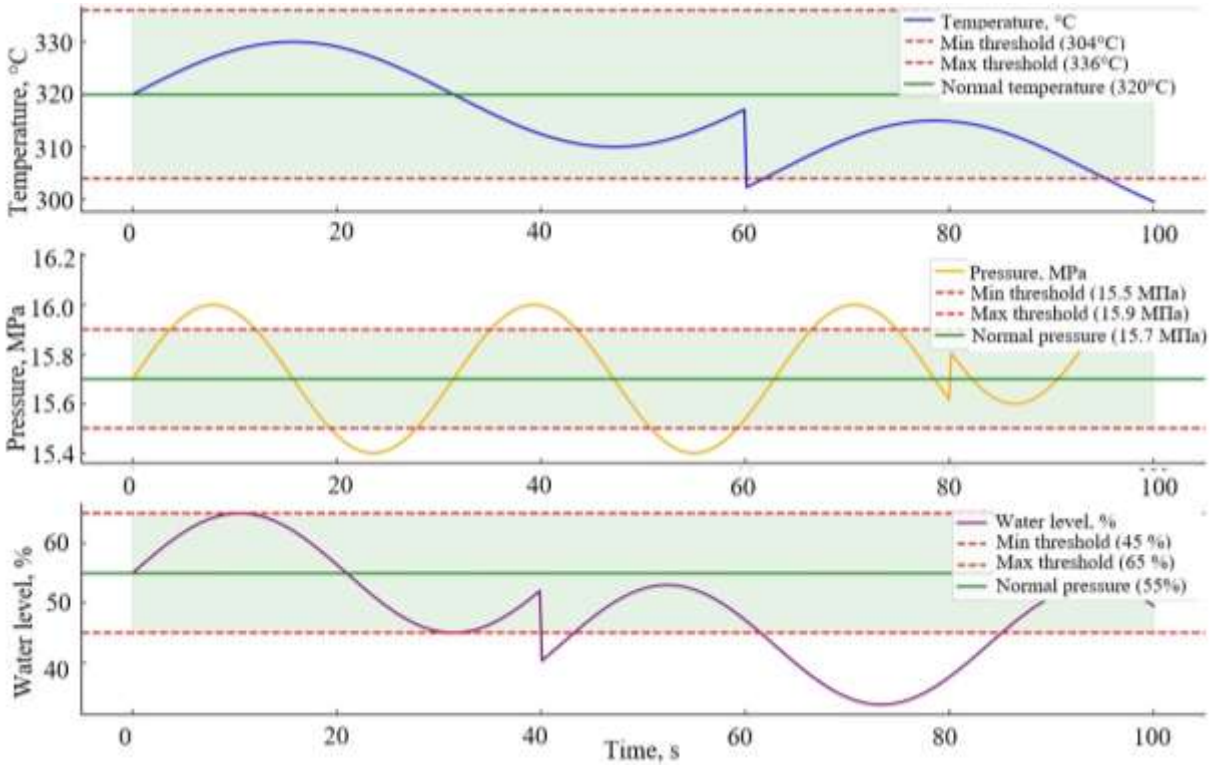



Fig. 2. Schedule of changes in technological parameters in the first circuit of the NPP power unit

As shown in Fig. 1, such a change in parameters forms a stable anomalous trajectory of the process, which may indicate a violation of heat exchange, local hydraulic disturbance or leakage of the coolant. In the practice of operating NPP power units, such a combination of features is characteristic of the pre-emergency mode, which requires immediate response from automatic protection systems and operational personnel.

The results of the numerical simulations summarized in Table 1 allowed to quantify the efficiency of the application of Grover's algorithm.

For the study, it was assumed that the temperature has 100 possible values, the pressure is 200, the coolant level is 50, and the neutron flux is 100. In such a case, the total number of possible states is: $N$=100×200×50×100=$10^8$. Provided that the number of emergency states is M = $10^3$, the optimal number of iterations of the algorithm is: k=248.

Table 1

**The results of a numerical experiment using Grover's algorithm**

| Parameter | Number of values | Emergency signal amplitude | Number of iterations |
|---|---|---|---|
| Temperature (T), °C | 100 | 0.01 | 248 |
| Pressure (P), МПа | 200 | 0.005 | 248 |
| Coolant level (L), % | 50 | 0.02 | 248 |
| Neutron flux level (R), neutrons /(см²·с) | 100 | 0.01 | 248 |

As can be seen from Table 1, only 248 iterations are sufficient to detect an emergency state, while the classic sequential traversal algorithm requires an average of $10^5$ operations.

Thus, acceleration is achieved by more than 400 times, which is of fundamental importance for solving problems in real time within the framework of the information and control systems of PTK ACS TP power units of NPPs.

**Conclusion**. The results obtained confirm that the use of Grover's quantum algorithm opens up new possibilities for the construction of high-speed systems for diagnosis, prediction and early detection of deviations in complex technological objects. It is especially important that as the dimensionality of the information space increases, the effectiveness of the quantum approach only increases.

At the same time, a number of limitations related to the current level of development of quantum computing systems should be taken into account, in particular, the problems of noise, decoherence and the complexity of integration with existing SCADA and DCS platforms. However, even under these conditions, the proposed approach has significant scientific and practical significance as a promising direction for the modernization of critical energy infrastructure management systems.

It is advisable to direct further research to the development of an adaptive quantum oracle for dynamic updating of a set of critical states in real time, as well as to the integration of the obtained results with digital doubles of NPP power units.

## References


1. Budanov, P., Oliinyk, Yu., Cherniuk, A., Brovko, K.: Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters. In: AIP Conference Proceedings, p. 040015. Al-Samawa, Iraq: Al-Furat Al-Awsat Technical University, (2024). https://doi.org/10.1063/5.0191648
2. Budanov, P., Brovko, K., Melnykov, V., Yakymchuk, M., Kononov, V., Kyrysov, I., Nosyk, A., Karpenko, O., Kalnoy, S., Khomiak, E.: Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(9(136)), pp. 39–49, (2025). https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712
3. Durakovskiy, A.P., Gavdan, G.P., Korsakov, I.A., Melnikov, D.A.: About the cybersecurity of automated process control systems. Procedia Computer Science, 190, pp. 217–225, (2021). https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.027
4. Konishi, R., Sasano, M., Hayashi, M., Azuma, T.: Digitalization of Pulse Signal Processing for Ex-Core Instrumentation System in Nuclear Power Plants. Applied Sciences, 14(6), 2445, (2024). https://doi.org/10.3390/app14062445
5. Lin, T.H., Wang, T.C., Wu, S.C.: Deep learning schemes for event identification and signal reconstruction in nuclear power plants with sensor faults. Annals of Nuclear Energy, 154, 108113, (2021). https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108113
6. Qian, G., Liu, J.: A comparative study of deep learning-based fault diagnosis methods for rotating machines in nuclear power plants. Annals of Nuclear Energy, 178, 109334, (2022). https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109334
7. Chicayban Bastos, D., & Brasil Kowada, L.A. (2021). How to detect whether Shor's algorithm succeeds against large integers without a quantum computer. Procedia Computer Science, 195, 145-151. doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.11.020.

# USE OF INTER-NODE ASYMMETRY FOR VEHICLE FAULT LOCALIZATION IN EDGE COMPUTING ENVIRONMENTS

**Doskochynskyi D., Ivaskiv R.**
Lviv Polytechnic National University

**Abstract.** The paper presents a method for anomaly detection in vehicle telemetry data based on the analysis of inter-node signal asymmetry. The proposed approach utilizes clustering to model the normal state of the system and introduces a temporal persistence metric to filter out short-term interference. It is shown that the use of an asymmetry index allows for effective fault localization at the level of individual nodes, minimizing the impact of global disturbances. The method is designed for implementation in an Edge Computing environment for real-time data processing.

**Keywords:** telemetry, anomaly detection, clustering, inter-node asymmetry, vehicle, Edge Computing.

**Introduction.** Modern vehicle monitoring systems are based on processing telemetry data obtained from various sensor sources, including accelerometers, gyroscopes, and the CAN bus. It is known that anomalies in such data are difficult to detect due to the influence of external factors and noise [1], [2]. The use of Edge Computing significantly reduces processing delays and increases the efficiency of real-time data analysis [3], [8]. However, most existing approaches analyze signals in isolation, without considering the relationship between the nodes of the transport system.

**The purpose of the work is to** develop an anomaly detection method based on inter-node signal asymmetry to improve the accuracy of vehicle fault localization.

**Formulation of the problem.** During vehicle movement, telemetry signals are subject to the influence of road surface irregularities, changes in motion modes, and sensor noise. This complicates the detection of intermittent and hidden faults, particularly defects in electronic control units and grounding systems [6], [7]. Existing methods, including threshold and statistical approaches, do not provide sufficient accuracy due to the lack of consideration for inter-node relationships [2], [5].

**Solving the problem.** The proposed approach is based on the formation of feature vectors $x_i(t)$ for each sensor node within a sliding time window. To model the normal state, clustering without prior data labeling is used, which corresponds to modern approaches to telemetry analysis [5].

However, classical clustering-based anomaly detection methods suffer from several critical limitations when applied to real-world vehicle telemetry data. First, such methods are highly sensitive to global disturbances affecting all sensors simultaneously, such as road irregularities, braking events, or environmental conditions. In these cases, the entire feature space shifts, causing the model to incorrectly interpret normal system-wide behavior as an anomaly. Second, clustering approaches often produce a high number of false positives due to short-term noise spikes and transient deviations. These anomalies are typically non-persistent and do not correspond to actual faults, yet they distort cluster boundaries and degrade detection reliability. Third, conventional methods treat each sensor stream independently or rely on aggregated representations, which leads to a loss of spatial correlation between nodes. As a result, they fail to distinguish between localized faults (e.g., failure of a single wheel sensor) and global dynamic effects.

To address these limitations, the proposed workflow introduces an additional analytical layer based on inter-node asymmetry analysis. Instead of evaluating each node independently, the method compares the relative behavior of sensor nodes within the same time window.

To illustrate the effectiveness of the proposed approach, a synthetic scenario of telemetry data from four sensor nodes is considered. The system operates under normal conditions during the initial time windows, followed by the gradual emergence of a localized fault in one of the nodes. The evolution of anomaly intensity across nodes is visualized using a heatmap representation.

The heatmap visualization was generated programmatically in Python using the Pandas and Seaborn libraries based on the calculated inter-node anomaly intensity coefficients.

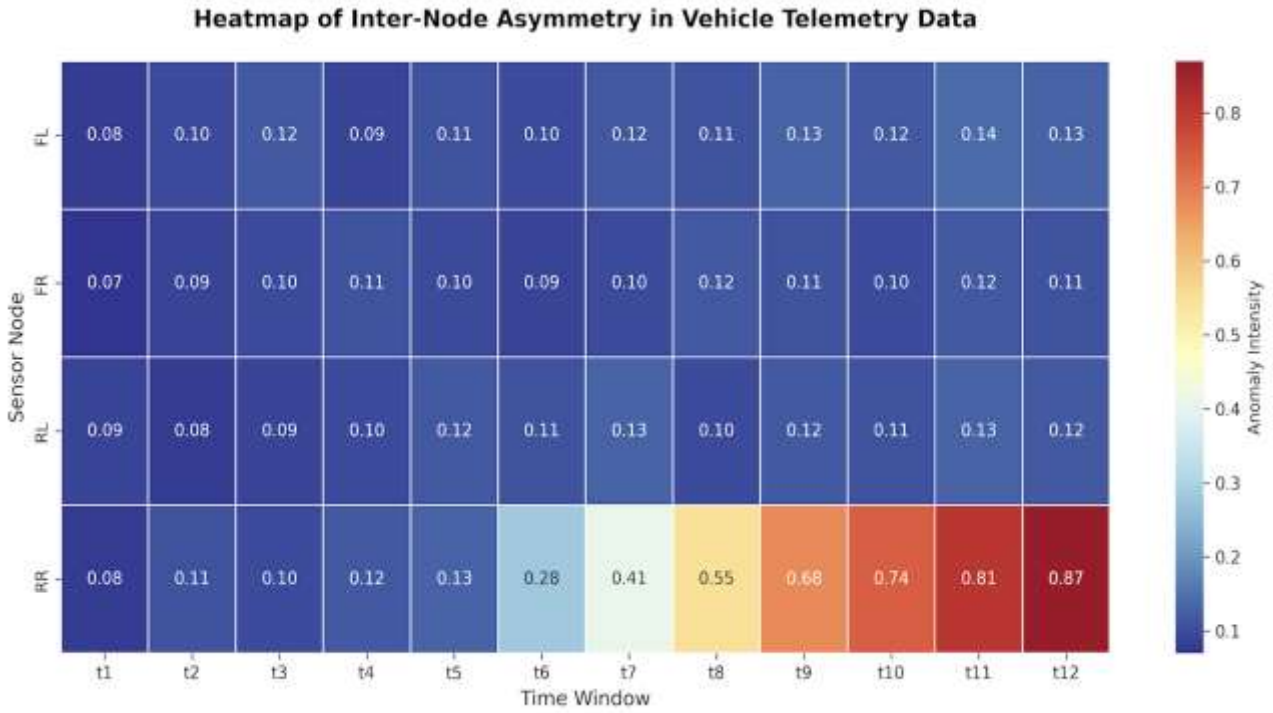



Fig. 1. Heatmap of inter-node asymmetry in vehicle telemetry data

For each node, an anomaly score is computed as:

$$d_i(t) = \min || x_i(t) - c ||. \quad (1)$$

To increase resistance to short-term interference, a temporal persistence metric is introduced:

$$P_i(t) = (1/N) * \sum a_i(k). \quad (2)$$

The key element is the inter-node asymmetry index:

$$A_i(t) = S_i(t) - \left(1/(M-1)\right) * \sum S_j(t), j \neq i, \quad (3)$$

where the integral anomaly indicator is defined as:

$$S_i(t) = \alpha * d_{i\_norm}(t) + \beta * P_i(t). \quad (4)$$

Thus, $d_i(t)$ reflects instantaneous deviation; $P_i(t)$ characterizes temporal stability; $A_i(t)$ allows for the evaluation of the node's relative behavior.

The decision regarding the presence of a fault is made under the conditions:

$$P_i(t) > \tau_p \text{ and } A_i(t) > \tau_a. \quad (5)$$

The threshold values $\tau_p$ and $\tau_a$ are selected empirically based on preliminary experiments. In future work, adaptive thresholding based on statistical properties of the data stream (e.g., mean and variance within sliding windows) will be considered to improve robustness under varying operating conditions. Unlike classical methods, such as centralized models or supervised learning, the proposed approach does not require labeled data, has lower computational complexity, and adapts better to changing operating conditions [4], [5]. The use of inter-node asymmetry allows for effective separation of local defects from global influences.

As shown in Fig. 1, the FL, FR, and RL nodes demonstrate stable behavior over time, with low anomaly intensity values. In contrast, the RR node exhibits a gradual and persistent increase in anomaly intensity starting from time window t6. This pattern indicates a localized fault affecting a single node rather than a global disturbance, which would impact all nodes simultaneously. The proposed asymmetry-based approach successfully isolates this deviation by comparing relative node behavior, thus avoiding false positives caused by system-wide fluctuations. The heatmap representation demonstrates the key advantage of the method: the ability to distinguish between transient noise and persistent localized anomalies, enabling reliable fault localization.

**Conclusions.** The proposed method provides an increase in the reliability of anomaly detection and allows for fault localization at the level of individual vehicle nodes. The use of inter-

node asymmetry reduces the number of false positives and increases the system's robustness to noise. Implementation in an Edge Computing environment provides the capability for real-time data processing, which is critical for modern transport systems.

## References


1. Hojjati, Hadi & Roth, Christopher & Woods, Rory & Sills, Ken & Armanfard, Narges. (2026). EngineAD: A Real-World Vehicle Engine Anomaly Detection Dataset. DOI: 10.48550/arXiv.2603.25955.
2. Rajbahadur, G.K., Malton, A.J., Walenstein, A., & Hassan, A. (2018). A Survey of Anomaly Detection for Connected Vehicle Cybersecurity and Safety. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 421-426.
3. Silva, Hyago & Rosim, Davi & Pereira de Figueiredo, Felipe & Mafra, Samuel & Khwaja, Ahmed. (2026). EdgeML-Driven Real-Time Vehicle Tracking and Traffic Control for Traffic Management in Smart Cities. Applied Sciences. 16. 2216. DOI: 10.3390/app16052216.
4. Cherdo, Y., Miramond, B., Pegatoquet, A., & Vallauri, A. (2023). Unsupervised Anomaly Detection for Cars CAN Sensors Time Series Using Small Recurrent and Convolutional Neural Networks. Sensors, 23(11), 5013. DOI: 10.3390/s23115013
5. Hirth, M., Meier, D., Gehring, O., Jazdi, N., & Kasneci, E. (2025). Unsupervised Deep Learning for Anomaly Detection in Automotive Trucks: A Survey. ACM Computing Surveys, 58(5), Article 117. DOI: 10.1145/3771089
6. Du, Xinyu & Jiang, Shengbing & Zhou, Dongyi & Milhim, Aladdin & Sadjadi, Hossein. (2023). Ground Fault Diagnostics for Automotive Electronic Control Units. International Journal of Prognostics and Health Management. 14. 1-13. DOI: 10.36001/IJPHM.2023.v14i3.3128.
7. Popenko, H. (2026) Methodology for Precise Diagnostics of Intermittent Faults in Powertrain and Electronic Systems of Sports and Luxury Cars (Oscilloscope, Can/Lin, Thermal Imaging) with Plain Client Explanations. Voice of the Publisher, 12, 165-176. DOI: 10.4236/vp.2026.122011.
8. Gong, T., Zhu, L., Yu, F. R., & Tang, T. (2023). Edge Intelligence in Intelligent Transportation Systems: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24(9), 8919–8944. DOI: 10.1109/TITS.2023.3275741

# HYBRID MODELING OF MICROSERVICE ARCHITECTURES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF ADL AND DSL

**Gizun A.[1], Morhun A.[2], Borysenko I.[2]**
[1] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2] National University Kyiv Aviation Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Microservice architectures enhance scalability and flexibility but introduce significant complexity in analysis and evolution, necessitating formal modelling approaches. This paper investigates Architecture Description Languages (ADL) and Domain-Specific Languages (DSL) for microservice modelling, emphasising the trade-off between formal rigour and domain-oriented expressiveness. Based on a comparative analysis, the paper proposes a hybrid ADL–DSL approach within the Model-Driven Engineering paradigm that integrates formal verification with practical development needs, thereby improving the consistency, analysability, and evolution of microservice systems.

**Keywords**: Microservice Architecture, Architecture Description Languages, Domain-Specific Languages, Model-Driven Engineering, Software Architecture Modelling, Architectural Analysis.

**Introduction**. Microservice architecture is a widely adopted approach for designing distributed, cloud-native systems; however, the increasing number of services and their interactions significantly complicate architectural consistency, analysis, and system evolution. The decentralised development and independent deployment of services often lead to the fragmentation of architectural knowledge and increase the risk of architectural erosion [1]. In addition, traditional informal architectural representations lack precise semantics, which limits the possibility of automated analysis and verification of system properties [2]. Furthermore, the gap between high-level architectural design and low-level deployment artefacts complicates maintaining architectural consistency in practice [3], [4].

These challenges highlight the need for formalised modelling approaches that enable explicit representation of system structure, interactions, and architectural constraints, while supporting both analysis and integration with modern development processes [5], [6]. In this context, Architecture Description Languages (ADL) provide formal mechanisms for representing architectural elements and enabling rigorous analysis and verification of system properties [7]. In contrast, Domain-Specific Languages (DSL) support modelling using domain-oriented abstractions that improve understandability and facilitate integration with development workflows [8], [9]. However, existing approaches typically focus on either formal architectural modelling or domain-oriented representation, leaving the problem of their effective integration insufficiently addressed.

**The purpose of the work** is to conduct a comparative analysis of Architecture Description Languages (ADLs) and Domain-Specific Languages (DSLs) in the context of microservice architecture modelling, and to justify a hybrid modelling approach that integrates their advantages within the Model-Driven Engineering paradigm.

**Formulation of the problem**. Existing approaches to modelling microservice architectures demonstrate a fundamental limitation: ADL provide formal rigour and support architectural verification, but are difficult to apply in practice, whereas DSL offer domain-oriented expressiveness and integration with development processes but lack formal analytical capabilities. The absence of an integrated approach limits the ability to ensure both analysability and practical applicability of architectural models.

**Solving the problem**. Based on the comparative analysis presented in Table 1, evaluating ADL and DSL across criteria such as abstraction level, architectural expressiveness, formal semantics, domain orientation, analysis support, code generation, and tool support, a hybrid ADL–DSL approach is proposed. The proposed approach is conceptual in nature and provides a methodological foundation for integrating ADL and DSL within the Model-Driven Engineering paradigm. To address the identified limitations of existing approaches, the proposed approach integrates the formal analysis capabilities of ADL with the domain-oriented expressiveness of DSL within a unified modelling framework. Since neither approach alone fully satisfies these criteria, the proposed approach combines their complementary strengths and is formulated as a structured, multi-level modelling process. The approach comprises four main stages: (1) domain modelling

using DSL to capture system requirements, service boundaries, and interactions at the level of domain abstractions; (2) transformation of DSL models into ADL-based architectural specifications through formally defined mappings; (3) formal architectural analysis of the resulting models to verify structural and behavioural properties; and (4) potential automated generation of implementation-related artifacts, such as service definitions, API specifications, and deployment configurations. This staged process enables a systematic transition from domain-level representations to formally analysable architectural models while preserving architectural constraints and ensuring traceability across abstraction levels.

Table 1

**Comparison of ADL and DSL based on criteria for modelling microservice architectures**

| Criteria | ADL | DSL |
|---|---|---|
| Abstraction level | High (structural aspects of architecture) | High (domain-level abstractions, business logic and service interfaces) |
| Architectural expressiveness | High (components and connectors as first-class entities) | Moderate (often focused on services and APIs) |
| Formal semantics | Formal (CSP, process calculi, formal models) | Semi-formal (patterns, metamodels, DSL grammars) |
| Domain orientation | Low (general architectural concepts) | High (microservices and Domain-Driven Design concepts) |
| Analysis support | Strong (property verification, interaction analysis) | Contextual (analysis of contracts, dependencies, coupling) |
| Code generation | Limited or partial | Advanced (generation of services, APIs, configurations) |
| Tool support | Primarily research-oriented (limited industrial tool support) | Often integrated with MDE and DevOps tools |

The proposed approach is based on a clear separation of concerns between DSL and ADL, enabling domain experts and software architects to operate at appropriate levels of abstraction while maintaining a unified architectural representation. DSL models capture domain-specific requirements, service boundaries, and interactions using domain-oriented abstractions, whereas ADL specifications formalise the structural and behavioural aspects of the system, supporting rigorous analysis of interactions and constraints. In practice, the DSL layer can be instantiated using existing domain-specific modelling frameworks, such as LEMMA or Microservice API Patterns (MAP), while the ADL layer may rely on established languages such as Acme or xADL [10], [11], [12]. The integration is supported by a shared metamodel that defines correspondences between domain concepts and architectural elements and acts as a validation boundary: domain constructs that violate architectural constraints (e.g., incompatible interaction patterns or invalid dependencies) are rejected or require refinement during transformation. This layered organisation enables iterative refinement of architecture and introduces feedback loops between design, analysis, and implementation stages, contributing to more robust and consistent architectural decision-making.

At the same time, the transformation from DSL to ADL representations introduces inherent challenges due to differences in abstraction levels and semantic assumptions. In particular, a degree of semantic loss may occur when domain-specific concepts or contextual information lack direct equivalents in the formal architectural model. Therefore, transformation rules must be carefully designed to preserve essential system properties while maintaining analysability of the resulting models. A key element of the approach is the use of extensible and maintainable transformation rules defined through the shared metamodel, which ensures consistent mapping of domain constructs (e.g., services, API contracts, data flows) to architectural elements (components, interfaces, ports, connectors). This design also supports system evolution by enabling synchronised updates to DSL and ADL models in response to changing requirements and technological conditions, thereby laying a foundation for consistent model co-evolution within the Model-Driven Engineering process.

To illustrate the applicability of the proposed approach, a preliminary case study scenario is considered in the context of a microservice-based e-commerce system. At the DSL level, the system

is modelled using domain concepts such as services (e.g., Order, Payment, Inventory), API contracts, and data flows between components. These models are then transformed into ADL-based architectural specifications, where services are represented as components, interactions as connectors, and communication patterns as formally defined protocols. The resulting ADL model enables verification of architectural properties, such as correctness of service interactions and absence of invalid dependencies, which are not explicitly analysable at the DSL level. Although illustrative, this example demonstrates the practical applicability of the approach and motivates further empirical evaluation in real-world systems.

**Conclusion**. The proposed hybrid approach combines the formal verification capabilities of ADL with the domain-oriented expressiveness of DSL, enabling consistent architectural representation across multiple abstraction levels. It provides a conceptual foundation for improving the design, analysis, and evolution of complex microservice systems, while addressing the limitations of using each approach independently. Furthermore, the integration within the Model-Driven Engineering paradigm facilitates the alignment between architectural models and implementation artefacts. The proposed approach establishes a basis for the development of automated tools for model transformation, validation, and artefact generation. Future work should focus on the implementation of the approach, development of supporting tooling, and empirical evaluation in real-world microservice systems.

## References


1. Bushong V., Abdelfattah A. S., Maruf A. A., Das D., Lehman A., Jaroszewski E., Coffey M., Cerny T., Frajtak K., Tisnovsky P., Bures M. On microservice analysis and architecture evolution: A systematic mapping study // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 17. Article No. 7856. https://doi.org/10.3390/app11177856
2. Pahl C., Jamshidi P. Microservices: A systematic mapping study // In: Proceedings of the 6th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER), Rome, Italy, 2016. SciTePress, 2016. P. 137–146. https://doi.org/10.5220/0005785501370146.
3. Esparza-Peidro J., Muñoz-Escoí F. D., Bernabéu-Aubán J. M. Modeling microservice architectures // Journal of Systems and Software. 2024. Vol. 213. Article No. 112041. https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112041.
4. Rademacher F., Sorgalla J., Sachweh S. Challenges of domain-driven microservice design: A model-driven perspective // IEEE Software. 2018. Vol. 35, № 3. P. 36–43. https://doi.org/10.1109/MS.2018.2141028.
5. Giallorenzo S., Montesi F., Peressotti M., Rademacher F. Model-Driven Generation of Microservice Interfaces: From LEMMA Domain Models to Jolie APIs // In: Coordination Models and Languages. COORDINATION 2022, Lucca, Italy, 13–17 June 2022. Cham : Springer, 2022. (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 13271). P. 223–240. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08143-9_13.
6. Rademacher F., Sorgalla J., Wizenty P., Trebbau S. Towards Holistic Modeling of Microservice Architectures Using LEMMA // In: Proceedings of the Second International Workshop on Model-Driven Engineering for Software Architecture (MDE4SA 2021), Virtual Event, 13 September 2021. 2021.
7. Medvidović N., Taylor R. N. A classification and comparison framework for software architecture description languages // IEEE Transactions on Software Engineering. 2000. Vol. 26, No. 1. P. 70–93. https://doi.org/10.1109/32.825767
8. Mernik M., Heering J., Sloane A. M. When and how to develop domain-specific languages // ACM Computing Surveys. 2005. Vol. 37, No. 4. P. 316–344. https://doi.org/10.1145/1118890.1118892.
9. van Deursen A., Klint P., Visser J. Domain-specific languages: An annotated bibliography // ACM SIGPLAN Notices. 2000. Vol. 35, No. 6. P. 26–36.
10. Garlan D., Monroe R., Wile D. Acme: an architecture description interchange language // In: Proceedings of the CASCON First Decade High Impact Papers, Toronto, Canada, 1–4 November 2010. ACM, 2010. P. 159–173. https://doi.org/10.1145/1925805.1925814.
11. Khare R., Guntersdorfer M., Oreizy P., Medvidovic N., Taylor R. N. xADL: Enabling Architecture-Centric Tool Integration with XML // In: Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-34), Maui, USA, 3–6 January 2001. IEEE, 2001. https://doi.org/10.1109/HICSS.2001.927248.
12. Zimmermann O., Stocker M., Lübke D., Pautasso C., Zdun U. Introduction to Microservice API Patterns (MAP) // In: Joint Post-proceedings of the First and Second International Conference on Microservices (Microservices 2017/2019). Dagstuhl : Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2019. (OASIcs OpenAccess Series in Informatics). P. 4:1–4:17. https://doi.org/10.4230/OASIcs.Microservices.2017-2019.4.

# HIGH-PERFORMANCE SPEED CONTROL OF DFIM USING VECTOR CONTROL AND POSICAST TECHNIQUE

**Herizi A.[1], Ouagueni F.[1], Abed A.[1], Rouabhi R.[1], Zemmit A.[1], Boureguig K.[2]**
[1]GE Laboratory (LGE), Faculty of Technology, University Mohamed Boudiaf of M'sila - 28000, Algeria
[2]Departement of Mechanical Engineering, Ibn Khaldoun University, Tiaret, Algeria

**Abstract**. This paper proposes a high-performance speed control strategy for a Doubly Fed Induction Machine (DFIM) based on the integration of vector control and a Posicast controller. Field-Oriented Control (FOC) ensures decoupled regulation of torque and flux, enabling fast dynamic response. However, conventional Proportional–Integral (PI) controllers exhibit performance degradation under nonlinearities, parameter variations, and external disturbances.

To overcome these limitations, a Posicast-based controller is incorporated into the speed control loop to enhance transient performance without increasing system complexity. The proposed control scheme is modeled and implemented in MATLAB/Simulink. Its performance is evaluated under various operating conditions, including step changes in speed reference and load torque disturbances.

Simulation results demonstrate that the proposed approach significantly reduces overshoot, shortens settling time, and improves robustness compared to the conventional PI controller. The findings confirm that the proposed method provides an effective and low-complexity solution for high-performance DFIM drive systems.

**Keywords**: Doubly Fed Induction Machine (DFIM), Vector Control, Field-Oriented Control (FOC), Posicast controller, Speed Control, high-performance Drive, Robust Control, MATLAB/Simulink.

**Introduction**. The growing demand for high-performance electric drive systems has intensified research efforts toward advanced control strategies for induction machines. Among these, the Doubly Fed Induction Machine (DFIM) has gained significant attention due to its high efficiency, reduced converter rating, and suitability for variable-speed applications, particularly in renewable energy systems [1].

Field-Oriented Control (FOC), also known as vector control, is widely employed in DFIM drives to achieve decoupled control of torque and flux, providing fast dynamic response and high precision [2]. Despite its advantages, the overall performance of the vector-controlled system strongly depends on the design of the speed controller used in the outer loop.

Conventional Proportional–Integral (PI) controllers are commonly used in industrial applications due to their simple structure and ease of implementation. However, their performance degrades in the presence of nonlinearities, parameter uncertainties, and external disturbances, which are inherent characteristics of DFIM systems [3]. These limitations often lead to overshoot, longer settling time, and reduced robustness under varying operating conditions.

To address these challenges, recent research has explored advanced control techniques such as model predictive control and artificial intelligence-based approaches to enhance system performance and robustness [4], [5]. Although these methods improve control accuracy, they often increase computational complexity and implementation cost. Therefore, achieving a balance between high dynamic performance and low implementation complexity remains an open research challenge [6].

In this context, the Posicast controller [7] presents an effective alternative for improving transient response by reducing overshoot and oscillations without significantly increasing system complexity. However, limited work has addressed the integration of Posicast control with vector-controlled DFIM drives.

**The purpose of the work**. This paper proposes a high-performance speed control strategy for a DFIM based on vector control combined with a Posicast controller. The proposed approach is implemented and evaluated using MATLAB/Simulink. Its performance is compared with that of a conventional PI controller under various operating conditions, including step changes in speed reference and load disturbances.

The main contributions of this work can be summarized as follows:

1. Integration of a Posicast controller into the speed control loop of a vector-controlled DFIM;
2. Significant improvement in transient response, including reduced overshoot and faster settling time;
3. Enhanced robustness under parameter variations and load disturbances.

**Formulation of the problem**. Induction machine drives, particularly DFIM systems, are inherently nonlinear and subject to parameter variations and external disturbances. In vector-controlled systems, the speed loop plays a crucial role in determining overall performance.
Conventional PI controllers, although widely used, fail to ensure satisfactory transient performance, especially under sudden changes in speed reference or load torque. These limitations motivate the need for improved control strategies capable of enhancing dynamic response while maintaining simplicity.
The objective of this work is to design a robust speed controller based on the Posicast technique to improve transient response and reduce overshoot in DFIM drives.

**Solving the problem**. The proposed control strategy integrates a Posicast controller into the speed loop of a vector-controlled DFIM.

The principle of the Posicast controller is based on shaping the reference input signal to cancel oscillations and reduce overshoot. The transfer function is given by the function $I + P(s)$, where $P(s)$ is given by:

$$P(s) = \frac{d}{1+d}\left(-1 + exp\left(-\frac{T_d}{2}\right)s\right),$$

where:

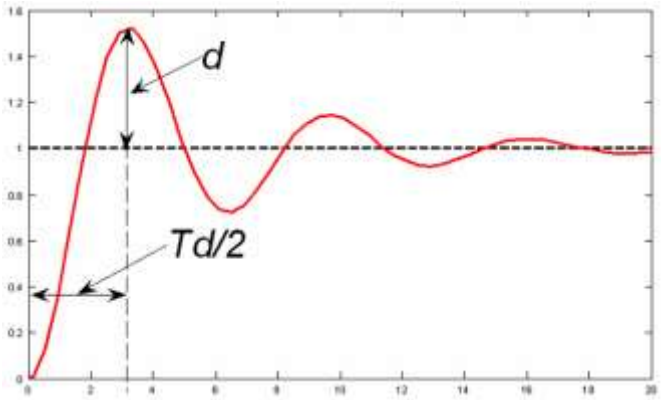



Fig. 1.

The DFIM is controlled using standard vector control equations, ensuring decoupling between torque and flux components.

Speed control with POSICAST:

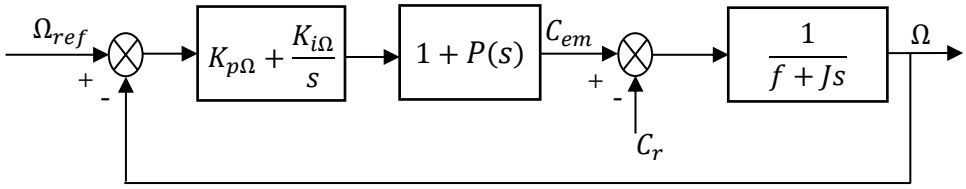



Fig. 2.

Simulation is carried out using MATLAB/Simulink to evaluate system performance.

**Results and Discussion**. Simulation results are obtained under different operating conditions:

- Step change in speed reference;
- Load torque disturbance;
- Parameter variations;

– The proposed Posicast controller demonstrates:
  - Reduced overshoot;
  - Faster settling time;
  - Improved robustness.

Compared to the conventional PI controller, the proposed method achieves superior dynamic performance and better disturbance rejection.

**Conclusion**. This paper presented a high-performance speed control strategy for a DFIM using vector control and a Posicast controller.

The results confirm that the proposed approach significantly improves transient response and robustness compared to conventional PI control, while maintaining low implementation complexity.

Future work will focus on experimental validation and real-time implementation of the proposed control strategy.

## References


1. A. Herizi, R. Rouabhi, F. Ouagueni and A. Zemmit, “Robust Wind Power Control Using Sliding Mode, Backstepping and Fuzzy Logic” Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, Vol. 70, No. 3, pp. 313-318, 2025.
2. R. Rouabhi, A. Zemmit, A. Herizi, O. Moussa and S. Djeriou, “Hybrid type-2 fuzzy backstepping control of doubly fed induction generator for wind energy conversion systems, ” Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 47, no. 24, 2025.
3. X. Wang et al., “Model Predictive Control of Doubly Fed Induction Motors Based on Fuzzy Logic,” Machines, vol. 14, no. 1, 2026.
4. A. Herizi,; R. Rouabhi and A. Zemmit, “Speed control of doubly fed induction motor using backstepping control with interval type-2 fuzzy controller, ” Diagnostyka, v. 24, no. 3, p. 1-8, 2023.
5. S. Rezgui et al., “Nonlinear Vector Control of Multiphase Induction Motor Using LQR and ADRC,” Electrical Engineering & Electromechanics, 2025.
6. A. A. Z. Diab et al., “A Comprehensive Examination of Vector-Controlled Induction Motor Drive Techniques,” Energies, 2023.
7. H. Ghorbani, S. Masoudi and V. Hajiaghayi, “Speed Control of Vector Controlled Induction Motors with Fuzzy and Posicast Controller,” Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 5, no. 7, p. 1099-1106, 2011.

# GIS-BASED ENVIRONMENTAL MONITORING FRAMEWORK FOR ACTIVE COMBAT ZONES USING INTEGRATED REMOTE SENSING AND EXPERT MODELING SYSTEMS

**Honcharenko I.[1], Chumachenko S.[2], Yakovliev E.[3], Sokolov Y.[4]**
[1] University of Eastern Finland, Kuopio, Finland
[2] National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine
[3] Institute of Telecommunications and Global Information Space, Kyiv, Ukraine
[4] Institute of Marine Biology, National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine

**Abstract.** The ongoing conflict in Eastern Ukraine has caused significant environmental degradation in active combat zones, especially in heavily industrialized regions such as Donbas. Military operations intensify existing ecological pressures through landscape transformation, atmospheric pollution, hydrological disturbances, destruction of industrial infrastructure, and contamination of soils and groundwater. This study proposes a GIS-based environmental monitoring framework integrating remote sensing technologies, geospatial analysis, open environmental data and expert modeling systems for ecosystem assessment in active combat zones. The framework combines satellite remote sensing, environmental information systems, ecological benchmark models, automated monitoring components and spatial analysis tools to support environmental risk assessment and decision-making. A structural scheme is proposed that includes the Information and Measurement Monitoring System, Natural Environment Model, Ecological Benchmark Model and Expert Modeling System. The proposed approach supports adaptive identification of environmental hazards, pollution source detection, ecosystem state monitoring and forecasting of environmental changes in conflict-affected territories.

**Keywords:** environmental monitoring, GIS, remote sensing, active combat zones, ecosystem assessment, environmental modeling, geospatial analysis, open-data monitoring.

**Introduction.** The Donbas region has historically undergone extensive anthropogenic transformation due to the long-term development of mining, metallurgical, chemical and energy industries. Decades of industrial activity created substantial pressure on landscapes, groundwater and surface water systems, the biosphere and the lower atmosphere [1]. Since the beginning of the armed conflict in Eastern Ukraine, these pressures have been amplified by direct military impacts, damage to industrial facilities, fires, hazardous material releases and restrictions on field environmental monitoring [2], [3]. Traditional monitoring systems are insufficiently adapted to the conditions of active combat zones because field access is limited, environmental processes are dynamic and damage may spread beyond the immediate area of military operations [4]. Therefore, environmental assessment requires the integration of Earth observation data, geographic information systems and expert modeling approaches capable of supporting operational decision-making under uncertainty [5]. The purpose of this work is to develop a GIS-based environmental monitoring framework for active combat zones using integrated remote sensing, open-data geospatial sources and expert modeling systems.

**Method and Theory.** A defining characteristic of war-induced technogenic activity is the dominance of military priorities, which determine battlefield operations and become a major driver of environmental degradation [2]. Active combat zones are associated with rapid landscape transformation, contamination of hydrological systems, disturbance of geological structures, atmospheric pollution and ecosystem fragmentation. In the Donbas region, environmental risks are additionally intensified by a high concentration of mining and industrial objects. Coal waste heaps, flooded mines, damaged water infrastructure and industrial storage sites may act as long-term sources of pollution. These facilities can release toxic gases, heavy metals and particulate matter into the environment, creating complex spatial patterns of ecological risk [1], [2]. The proposed monitoring framework considers environmental monitoring in active combat zones as a multi-level information system integrating observation, ecosystem assessment, forecasting and environmental management. The framework is based on the interaction between monitoring data, natural environment models, ecological benchmark models and expert modeling systems [5]. The structural logic of the proposed monitoring system can be represented as follows:

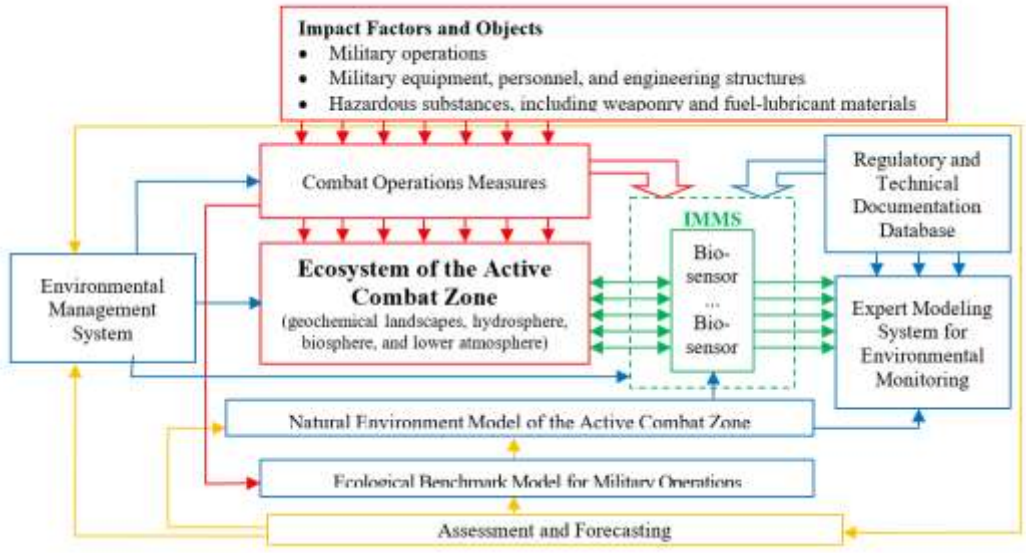



Fig. 1. Structural scheme of GIS-based environmental monitoring in active combat zones

The Information and Measurement Monitoring System serves as the central component of the monitoring architecture. It integrates satellite remote sensing, UAV observations, wireless sensor systems, environmental databases and GIS modules for data processing and visualization [4], [5]. The ecosystem component includes geochemical landscapes, hydrosphere, biosphere and lower atmosphere affected by combat operations. The Natural Environment Model describes baseline and current environmental conditions, while the Ecological Benchmark Model provides a reference for assessing deviations in air, water and soil quality.

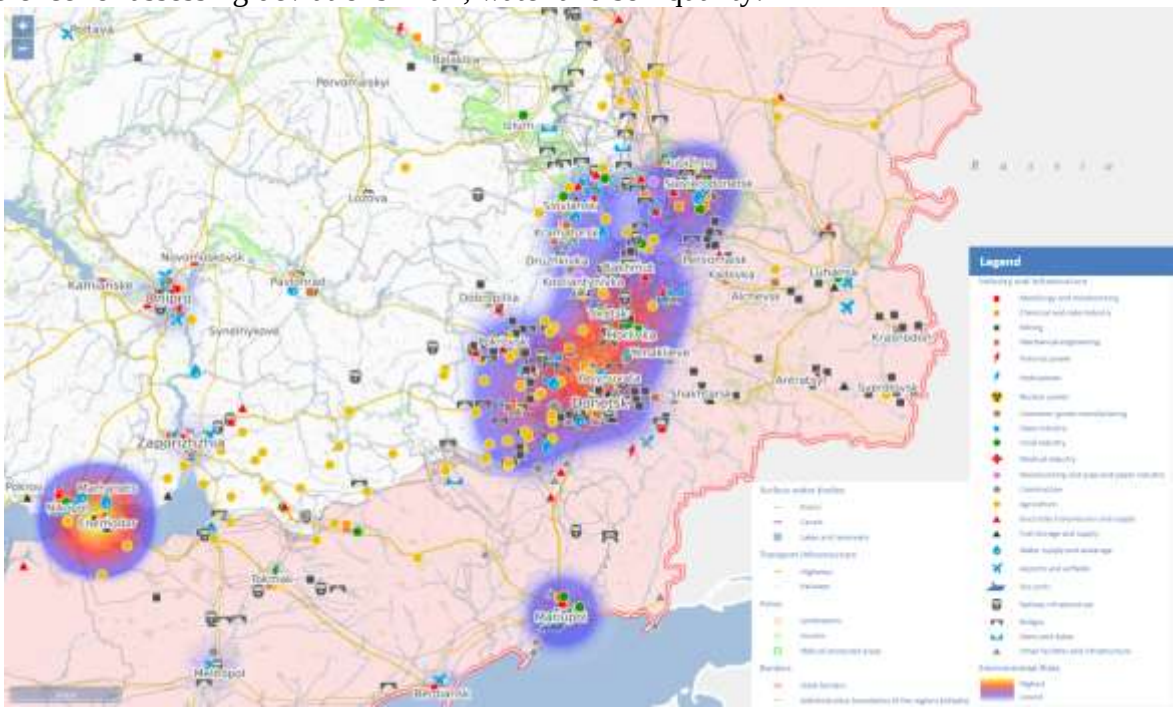



Fig. 2. Environmental consequences and risks of hostilities in Ukraine (Ecodozor data [6])

Open-data GIS integration is a key methodological element. The framework may use Sentinel-2 data for vegetation and land-cover monitoring and Sentinel-5P data for atmospheric pollution assessment [7]. OpenStreetMap can be applied for infrastructure mapping [8], biodiversity databases for ecosystem sensitivity assessment [9], while public hydrological and cadastral datasets provide additional spatial contextualization. Such integration is particularly important for protected

and ecologically sensitive territories, where spatial monitoring can support biodiversity-oriented environmental management [10]. For integrated environmental risk assessment, the following generalized index may be applied: $R_e = \Sigma_{i=1}^{n} (W_i \times P_i)$, where $R_e$ is the integrated environmental risk index, $W_i$ is the weighting coefficient of the environmental factor, $P_i$ is the normalized environmental parameter and n is the number of indicators. Vegetation condition may be assessed by the normalized difference vegetation index: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, where NIR is near-infrared reflectance and RED is red spectral band reflectance. Atmospheric analysis may include Sentinel-5P indicators such as nitrogen dioxide ($NO_2$), carbon monoxide (CO) and aerosol index values [7].

**Results.** The proposed GIS-based framework enables the integration of heterogeneous environmental data into a unified spatial decision-support environment. It supports the identification of hazardous areas, assessment of atmospheric pollution, monitoring of vegetation degradation, evaluation of ecosystem stability and forecasting of environmental changes under conditions of limited field access. Compared with fragmented monitoring procedures, the integrated approach provides continuous spatial coverage, compatibility with open-data sources, rapid visualization and scalability from local to regional levels. It also enables the development of environmental zoning layers to identify high-risk areas, pollution migration pathways, damaged ecosystems and territories requiring priority recovery. The combination of remote sensing indicators and expert modeling supports scenario-based assessment of environmental consequences under uncertainty.

**Conclusion.** Environmental monitoring in active combat zones is essential for assessing war-induced ecological damage and supporting mitigation strategies. The proposed GIS-based framework integrates remote sensing, open environmental data, expert modeling and geospatial analysis within a unified monitoring architecture. Its main scientific and practical contribution is a structured approach that combines observation, ecosystem assessment, benchmark modeling, forecasting and decision support. The framework can be applied for environmental risk assessment, recovery planning, spatial zoning and post-conflict environmental evaluation. Further research should focus on automated risk modeling, machine learning integration and adaptive geospatial monitoring systems.

## References


1. Yakovliev, Y., Chumachenko, S. *Ecological Threats in Donbas, Ukraine*. Centre for Humanitarian Dialogue, Geneva, Switzerland, 2017. Available at: https://ceobs.org/wp-content/uploads/2020/04/Ecological-Threats-in-Donbas.pdf
2. Denisov, N., Averin, D., Yushchuk, A., Yermakov, V., Ulytskyi, O., Bystrov, P., Zibtsev, S., Chumachenko, S., Nabyvanets, Y. *Environmental Assessment and Recovery Priorities for Eastern Ukraine*. Kyiv: VAITE, 2017. Available at: https://www.osce.org/files/f/documents/4/3/362566_0.pdf
3. Zoï Environment Network. *The Environmental Consequences of the War against Ukraine: Preliminary Twelve-Month Assessment (February 2022 - February 2023)*. OSCE Ukraine Report, 2023. Available at: https://zoinet.org/product/osce-ukraine-one-year
4. Karpenko, M. I. et al. Argumentation of the efficiency of alternative monitoring means using Meshtastic and APRS. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2024, vol. 1, no. 5, pp. 154-160. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/24
5. Lysenko, A. I., Chumachenko, S. M., Shevchenko, V. L. *Mathematical Models and Information Technologies for Environmental Assessment and Forecasting in Test Polygons*. Kyiv-Sofia: Pro Langs, 2017.
6. Ecodozor. *Environmental Consequences and Risks of the Fighting in Ukraine*. Zoï Environment Network, OSCE Project Coordinator in Ukraine, REACH Humanitarian Initiative, and UN Environment Programme, 2023. Available at: https://ecodozor.org/index.php?lang=en
7. Copernicus Data Space Ecosystem. *Browser and Open Satellite Data Access*. Available at: https://browser.dataspace.copernicus.eu/
8. OpenStreetMap Foundation. *OpenStreetMap*. Available at: https://www.openstreetmap.org/
9. Global Biodiversity Information Facility (GBIF). *GBIF: Global Biodiversity Information Facility*. Available at: https://www.gbif.org/
10. Shumilo, L., Skakun, S., Gore, M. L. et al. Conservation policies and management in the Ukrainian Emerald Network have maintained reforestation rate despite the war. *Communications Earth & Environment*, 2023, vol. 4, article 443. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01099-4

# COMPUTATIONAL ANALYSIS OF SHEAR BUCKLING STRESS IN RECTANGULAR PLATES WITH ELASTICALLY SUPPORTED LONG EDGES

**Hudz S.[1], Gasii G.[2], Hasii O.[3], Molchanov P.[4]**
[1]Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine
[2]Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
[3]Poltava University of Economics and Trade, Poltava, Ukraine
[4]Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University, Poltava, Ukraine

**Abstract**. Thin-walled plated structural elements are widely used in modern steel structures due to their high efficiency and reduced material consumption. A typical example is a beam with a slender web or a plate girder, whose behavior can be described using plate theory. The purpose of this research is to analyze the shear buckling stress in rectangular plates representing beam web panels with elastically supported long edges. This study investigates the stability behavior of thin rectangular plates under shear stress, specifically examining the influence of boundary conditions along their longitudinal edges. The main objective is to determine how the elastic restraint of the plate edges influences the critical shear stress and post-buckling behavior. The study employs computational methods based on plate stability theory and numerical modeling approaches commonly used in structural analysis. The results demonstrate that elastic support conditions significantly affect the critical shear stress and provide a more realistic representation of the behavior of beam webs than simplified hinged boundary assumptions. The findings confirm that considering partial rotational restraint along the longitudinal edges allows for a more accurate prediction of buckling resistance and contributes to the efficient design of beams with slender webs.

**Keywords**: shear buckling, rectangular plate, thin-walled beam, elastic edge support, stability analysis, computational modeling.

**Introduction**. Beams with slender webs represent a class of thin-walled structural elements capable of operating efficiently even after local buckling of the web, provided that the material remains within the elastic range. In such structural systems, local buckling does not immediately lead to loss of load-carrying capacity but rather changes the stress-strain state of the element. Therefore, studying the behavior of the web as a thin plate is essential for substantiating the efficiency of lightweight beams in modern steel structures.

For a long time, the use of beams with thin webs was considered impractical because local buckling was treated as the onset of a structural limit state. However, experience in industries such as aerospace and shipbuilding has demonstrated that structures with thin plates can function reliably even after local buckling occurs. Despite this, the operation of slender-web beams has certain specific characteristics. The formation of local buckling waves may be accompanied by an audible popping or snapping sound. For this reason, it is advisable to allow such buckling to occur under permanent loads so that the beam subsequently operates in the post-buckling state under variable loads without sudden buckling events.

**Research Goal**. The goal of this research is to perform a computational analysis of the critical shear buckling stress in rectangular plates with elastically supported long edges that model the web panels of slender-web beams.

**Problem Statement**. The web panel of a beam with a slender web can be designed or modeled according to EN 1993-1-5 [1] as a thin rectangular plate subjected to shear stress. In real structures, the long edges of the plate are connected to the beam flanges, which possess significant flexural and torsional stiffness. These flanges provide partial rotational restraint along the plate edges, forming boundary conditions that differ from the commonly assumed simply supported edges. Therefore, it is necessary to investigate how elastic support along the longitudinal edges influences the critical shear stress of the plate and the stability characteristics of the web panel. Similar phenomena related to shear buckling in rectangular plates, web panels of plate girders, and elastic boundary conditions are described in [2–3].

**Main Part**. The behavior of a beam web panel can be conventionally divided into three stages. In the first stage, referred to as the pre-buckling stage, the web remains flat and the beam behaves similarly to a beam with a conventional rigid web. This stage ends when the web loses local

stability. Its duration is relatively short and largely depends on the initial geometric imperfections arising during manufacturing. The second stage corresponds to the elastic post-buckling behavior of the web. During this phase, the relationship between loads and deformations becomes nonlinear. Local buckling zones develop within the web panel, but after unloading, the web returns to its initial geometric shape. At the same time, stress redistribution occurs between the web and the beam flanges. The buckling of the web affects the flanges by inducing additional local bending. This stage ends when the stresses in the web or flanges reach their limiting values. The third stage is characterized by the development of plastic deformations in both the web and the flanges. Beam deflections increase rapidly, and plastic hinges may form in certain sections. At this point, the beam reaches its ultimate limit state and loses serviceability due to significant residual deformations.

The use of slender webs significantly reduces material consumption in steel structures. Reducing the web thickness by two to three times compared with conventional welded beams and by four to six times compared with rolled beams decreases the proportion of steel used in the web from approximately 45–55% to 25–35%. As a result, most of the material is concentrated in the flanges, where it is utilized more efficiently. This redistribution reduces the overall mass and cost of the structural element. In addition, manufacturing labor costs are reduced in beams without stiffeners. However, the flanges of deep beams are susceptible to twisting and therefore must possess sufficient flexural and torsional stiffness to resist twisting. Because of the stiffness of the flanges, the longitudinal edges of the web panel experience partial rotational restraint. Consequently, the commonly used assumption of simply supported boundary conditions along the long edges of the plate is overly simplified. A more realistic model considers elastic support conditions, which can significantly influence the calculated critical shear buckling stress. The numerical modeling results obtained in this study using COMSOL Multiphysics (Version 6.4 Build 293) software show that the difference between the critical loads can reach up to 50%, as illustrated in Fig. 1.

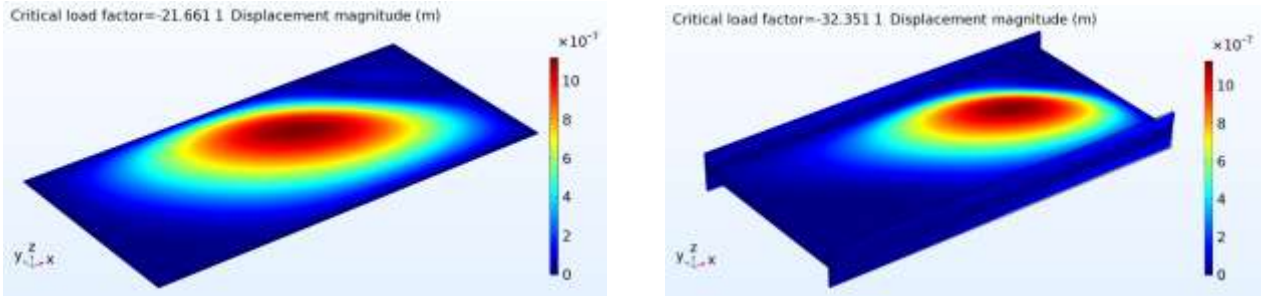



Fig. 1. Comparison of stress-strain states in a simply supported plate and a plate with elastically supported long edges

**Conclusion**. Slender-web beams represent efficient thin-walled structural systems capable of maintaining their load-carrying capacity even after local buckling of the web. The behavior of web panels can be divided into pre-buckling, elastic post-buckling, and plastic stages. Modeling the web as a rectangular plate subjected to shear stress provides a reliable basis for stability analysis.

In real structures, the beam flanges provide partial rotational restraint along the longitudinal edges of the web panel. Considering elastic support conditions instead of simplified hinged boundaries enables a more accurate prediction of the critical shear buckling stress and improves the reliability of structural design.

## References

1. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-5: Plated Structural Elements. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 56 p., (2006).
2. Wang, C., Liu, Q.: Buckling behaviour of rectangular and skew plates with elastically restrained edges under non-uniform mechanical edge loading. PLOS ONE, 19(9), e0308245, (2024). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308245.
3. Al-Azzawi, Z., Stratford, T., Rotter, J., Bisby, L.: Effect of flange and stiffener rigidity on the boundary conditions and shear buckling stress of plate girders. In: 15th European Bridge Conference & Exhibition. ECS Publications, Edinburgh, (2015).

# MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION AND CORRECTION OF DRILLING FLUID DENSITY MEASUREMENTS

**Khomenko V.[1], Ratov B.[2], Papaika Yu.[1], Volovyk V.[1], Vashchenko I.[1]**
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[2]Satpayev University Republic of Kazakhstan, Almaty, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** Accurate drilling fluid density measurement is critical for wellbore pressure balance and safe drilling. Conventional sensors suffer from errors due to temperature, pressure, aeration, and solids settling, especially under HPHT conditions. This study presents a hybrid machine learning approach combining real-time sensor data with historical records to predict and correct density measurements. Using Random Forest, XGBoost, and neural networks trained on labeled datasets (sensor readings plus laboratory reference values), the system detects anomalies and provides corrected density via ensemble techniques. Results show a 22–28% reduction in mean absolute percentage error (MAPE) compared to raw sensor data, validated on simulated and field datasets. The method enhances operational safety, optimizes weighting material usage, and supports real-time drilling fluid adjustments.

**Keywords:** Drilling Fluid Density, Machine Learning, Measurement Correction, Predictive Modeling, HPHT Conditions, Oil and Gas Drilling, Anomaly Detection.

**Introduction.** Drilling fluid density is one of the most important parameters in drilling operations, directly influencing hydrostatic pressure in the wellbore. Incorrect density can lead to well control incidents, formation damage, or non-productive time. While modern sensors (fluid balances, Coriolis flow meters, tuning fork devices) provide real-time data, they are susceptible to inaccuracies due to environmental factors, fluid composition changes, and calibration issues [1].

Traditional correction methods rely on empirical formulas or periodic manual recalibration, which are often insufficient in dynamic drilling environments. Machine learning offers a data-driven alternative by learning complex relationships between influencing variables and true density values [2].

**Work goal.** The goal of this work is to develop and validate a machine learning-based framework for real-time prediction and correction of drilling fluid density measurements to improve accuracy and reliability in field conditions.

**Problem statement.** Drilling fluid density measurements are affected by multiple factors including temperature-induced expansion/contraction, pressure compression, barite sag, gas entrainment, and sensor noise [3]. These lead to systematic and random errors that can compromise well control decisions [4]. The challenge lies in integrating multi-sensor data streams with historical reference measurements to create a robust correction model that operates effectively under variable operating conditions such as changing depth, rock types, and HPHT environments.

**Main part.** The proposed hybrid approach begins with data acquisition from surface sensors: fluid density meters (fluid balance, Coriolis), pressure transducers, temperature sensors, and auxiliary parameters such as flow rate, pump speed, and vibration signals from shakers and pumps [5]. All data are timestamped and synchronised at 1 Hz sampling rate to capture transient events like gas kicks or barite sag.

Raw data streams are cleaned by removing outliers using a moving median filter (window size = 10 s) and interpolating missing values (linear interpolation for gaps < 5 s, otherwise flagging). Features extracted include: temperature ($T$), pressure ($P$), flow rate ($Q$), root-mean-square ($RMS$) of pump vibration, calculated solids concentration proxy (from density and flow correlation), as well as derived variables such as $d\rho/dt$ (rate of density change) and temperature-pressure cross-product to capture non-linear coupling. Baseline empirical corrections for temperature and pressure are computed using the equations given below, but these serve only as input features to the ML model rather than final corrections.

The basic temperature correction for fluid density can be approximated as:

$$\rho_T = \rho_0 \cdot [1 - \beta\,(T - T_0)],$$

where $\rho_T$ is the density at temperature $T$, $\rho_0$ is the reference density at $T_0$, and $\beta$ is the thermal expansion coefficient.

Pressure correction is often expressed using compressibility:

$$\rho_P = \rho_0 \cdot \exp\left(\kappa\left(P - P_0\right)\right),$$

where $\kappa$ is the isothermal compressibility coefficient, $P$ = pressure, $P_0$ = reference pressure.

For more complex conditions, empirical or ML-corrected forms are used. The ML model predicts the correction factor $\Delta\rho$:

$$\rho_{\text{corrected}} = \rho_{\text{measured}} + \Delta\rho(\mathbf{x}),$$

where $\mathbf{x}$ is the feature vector (temperature, pressure, flow rate, vibration RMS, solids indicators, etc.), and $\Delta\rho(x)$ is the correction predicted by the machine learning model.

Three machine learning models are implemented: XGBoost (with hyperparameter tuning via Bayesian optimisation), Random Forest (500 trees, max depth 12), and a shallow neural network (two hidden layers, 64 and 32 neurons, ReLU activation). The hybrid system operates in two stages: first, raw sensor data are passed to an anomaly detection module (isolation forest) to identify erroneous spikes or sensor faults. If no anomaly is flagged, the ML model predicts a correction term Δρ. Training uses a labelled dataset pairing 600 hours of field measurements with laboratory reference densities (taken from a pressurised mud balance at the rig site every 2 hours). The dataset is split 70/30 for training/testing, with additional synthetic variations generated by adding Gaussian noise (±0.005 g/cm³) and applying physics-based perturbations (e.g., simulated gas expansion).

Experimental validation was performed on a dataset covering approximately 600 drilling hours, split 70/30 for training and testing. The best-performing model (XGBoost with hyperparameter tuning) achieved 94% accuracy in density prediction within ±0.02 g/cm³ tolerance, outperforming standalone sensor readings (error reduction of ~25%) and traditional empirical corrections (Fig. 1).

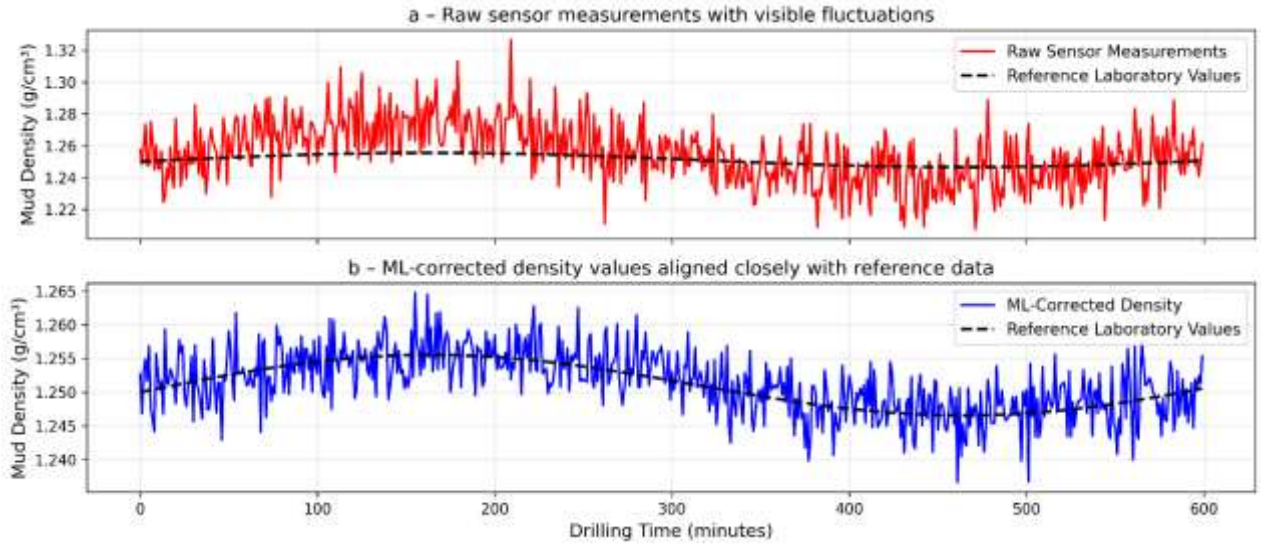



Fig. 1. Comparison of raw measured fluid density versus ML-corrected density over a drilling interval, showing reduced deviation from reference laboratory values. a – Raw sensor measurements with visible fluctuations; b – ML-corrected density values aligned closely with reference data

Equations for root mean square error (RMSE) evaluation of model performance:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\rho_{\text{pred},i} - \rho_{\text{actual},i}\right)^2},$$

where N is the number of samples.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) is calculated as:

$$\text{MAPE} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\rho_{\text{pred},i} - \rho_{\text{actual},i}}{\rho_{\text{actual},i}} \right|.$$

Comparison with traditional methods and computational performance. Unlike empirical correction tables (which require re-calibration for each mud system), the ML model adapts automatically when retrained weekly with new field data. Inference time per sample is < 10 ms on a standard industrial PC, suitable for real-time implementation. The system can also output a confidence interval for each prediction (e.g., using quantile regression forests), alerting the driller when the uncertainty exceeds a predefined threshold.

**Conclusions.** The developed machine learning-based approach significantly enhances the accuracy of drilling fluid density measurements by predicting and correcting errors in real time. It leverages the strengths of sensor data and advanced pattern recognition to reduce measurement uncertainty, particularly in challenging HPHT environments. Implementation of this system can decrease non-productive time, improve well control safety, and optimize the consumption of weighting agents. Future work includes larger-scale field trials, integration with IoT-enabled sensors, and extension to other fluid properties such as rheology.

## References


1. Shanmugasundar, G., Manjunatha, R. C., Čep, R., Kamaraj, L., Kaushik, V., Raju, Ss., & Muniyandy, E. (2024). Innovative machine learning for drilling fluid density prediction: a novel central force search-adaptive XGBoost in HPHT environments. *Frontiers in Energy Research*, *12*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1411751
2. Kirin, R., Ratov, B., Khomenko, V., Pashchenko, O., Hryshchak, S., Shukmanova, A., & Nurshakhanova, L. (2026). Artificial intelligence technologies in the mining industry: Economic and legal assessment. Mining of Mineral Deposits, 20(1), 125–141. https://doi.org/10.33271/mining20.01.123
3. Agwu, O. E., Akpabio, J. U., Alabi, S. B., & Dosunmu, A. J. (2018). Artificial intelligence techniques and their applications in drilling fluid engineering: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *167*, 300–315. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.04.019
4. Ahmadi, M., Shadizadeh, S. R., Shah, K. v., & Bahadori, A. (2018). An accurate model to predict drilling fluid density at wellbore conditions. *Egyptian Journal of Petroleum*, *27*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.12.002
5. Muratova, S., Ratov, B., Khomenko, V., Pashchenko, O., & Kamyshatskyi, O. (2025). Improvement of the methodology for measuring plastic viscosity and dynamic shear stress of drilling fluids. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, *1491*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1491/1/012026

# A SELECTION MODEL OF SENSOR NODES FOR INTELLIGENT PARKING SYSTEMS BASED ON FUZZY BWM AND FUZZY MARCOS

**Kononykhin O.**
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The selection of optimal sensor nodes is a critical multi-criteria decision-making (MCDM) challenge in IoT-based Smart Parking Systems. This paper proposes a hybrid framework integrating the Fuzzy Best-Worst Method (Fuzzy BWM) for criteria weighting and the Fuzzy MARCOS for alternative ranking. A key contribution is the introduction of an adaptive correction function based on physical degradation models (e.g., Arrhenius equation) to adjust sensor data for harsh environments. Validation through a case study of an open parking facility in winter conditions proves that the model effectively filters unsuitable options and identifies the optimal radar sensor node, demonstrating high stability with a Spearman correlation of $\rho \approx 0.865$.

**Keywords:** Smart Parking Systems, Sensor Nodes, Multi-Criteria Decision-Making, Fuzzy BWM, Fuzzy MARCOS, Environmental Degradation.

**Introduction.** The effectiveness of Smart Parking Systems (SPS) depends on selecting sensor nodes that balance accuracy, cost, and durability. This process is complicated by heterogeneous data: interval-based technical specifications and fuzzy linguistic evaluations. Traditional methods often fail to account for sensor performance degradation under environmental stress (snow, temperature). This work aims to formalize a robust selection model using a hybrid Fuzzy BWM-MARCOS approach that dynamically adapts to environmental profiles [1-3].

**The aim of the work** is to formalize the decision-making process for the technical equipment of intelligent parking systems by developing a sensor node selection model based on the Fuzzy BWM and Fuzzy MARCOS methods, providing high ranking accuracy under conditions of fuzziness and uncertainty of the input data.

**Formulation of the problem.** During operation in real-world conditions (e.g., street parking in winter), nominal sensor characteristics significantly deviate from datasheet values. The problem is to develop a mathematical framework that:

– translates idealized technical parameters into real-world performance indicators;

– handles the uncertainty of expert judgments using fuzzy logic;

– ranks alternatives relative to ideal and anti-ideal solutions while preventing rank reversal.

**Solving the problem.** To transform idealized characteristics into real operating indicators, an adaptive correction function $\eta_j(P)$. is introduced. The joint impact of the environment $P$ on the criterion $C_j$ is calculated via multiplicative convolution:

$$\eta_j(P) = \prod_{k=1}^{M} \delta_{jk}\,(p_k), \tag{1}$$

where $M$ – is the total number of independent context factors identified as significant for the given parking infrastructure (e.g., location, traffic type, climatic conditions); $k$ – is the ordinal index of the context factor ($k = 1, \dots, M$); $p_k$ – is the specific state or value of the $k$ -th context parameter (e.g., $p_1 = \{\text{undergroundparking}\}$); $\delta_{jk}(p_k)$ – is the partial impact coefficient of the $k$ -th factor in state $p_k$ on the $j$ -th criterion.

Multiplicative aggregation of degradation factors is applied based on the assumption of the approximate independence of the dominant influences, which is a classical approach in reliability theory and radio signal propagation models.

The calculated scalar $\eta_j(P)$ scales the initial fuzzy number element-wise, shifting its mathematical expectation toward real conditions while preserving the original interval variance

$$\tilde{x}_{uv,j}^{adj} = (l_{uv,j} \cdot \eta_j(P),\ m_{uv,j} \cdot \eta_j(P),\ u_{uv,j} \cdot \eta_j(P)). \tag{2}$$

The resulting adaptive matrix $\tilde{X}^{adj} = [\tilde{x}_{uv,j}^{adj}]$ serves as the basis for subsequent filtering of inadmissible solutions and multi-criteria ranking.

Unlike classical approaches with static weights, in the proposed model, the vector of fuzzy coefficients $\widetilde{W}(P) = (\widetilde{w}_1, \dots, \widetilde{w}_6)$ dynamically depends on the environment profile $P$. To aggregate context-dependent expert knowledge, the Fuzzy BWM method, adapted to the specifics of the Smart City, is applied.

**Weighting (Fuzzy BWM)** [4-5]**.** In this phase, a group of experts identifies the most critical criterion (Best, $C_B$) and the least significant one (Worst, $C_W$) based on the specific environmental profile $P. Pairwise comparison vectors are then constructed: the Best-to-Others vector $\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{Bn})$ and the Others-to-Worst vector $\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{1W}, \tilde{a}_{2W}, \dots, \tilde{a}_{nW})^T$. These comparisons are expressed as triangular fuzzy numbers (TFNs) to capture subjective uncertainty. To determine the optimal fuzzy weights $\widetilde{W}^*(P) = (\widetilde{w}_1, \widetilde{w}_2, \dots, \widetilde{w}_n)$, a non-linear constrained optimization model is solved. The objective is to minimize the maximum absolute differences $|\frac{\widetilde{w}_B}{\widetilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj}|$ and $|\frac{\widetilde{w}_j}{\widetilde{w}_W} - \tilde{a}_{jW}|$ for all $j$. This is achieved by decomposing the fuzzy ratios into a system of crisp linear inequalities for the TFN boundaries $(l, m, u)$ using the fuzzy division rule. The consistency of the results is strictly verified using the Consistency Ratio $CR = \xi^*/CI$. A value of $CR \leq 0.1$ ensures that the expert judgments are mathematically reliable and logical contradictions are minimized.

**Ranking (Fuzzy MARCOS)** [6-8]**.** The ranking process begins with the definition of a contextual reference space. Within the filtered set of feasible nodes $S_f$, the Ideal (AI) and Anti-Ideal (AAI) solutions are determined. AI represents the upper bound of performance for benefit criteria and the lower bound for cost criteria, while AAI represents the opposite. A linear normalization is then applied to the adjusted matrix $\tilde{X}^{adj}$ to bring all technical and economic indicators to a common dimensionless scale [0, 1]. To avoid mathematical artifacts during TFN division, the boundaries of the AI solution are used as scaling factors. The normalized matrix is weighted by the fuzzy multiplication operator using $\widetilde{W}^*(P)$. For each sensor node, the integral fuzzy sum $\tilde{S}_{uv}$ is computed, leading to the determination of fuzzy utility degrees: $\widetilde{K}_{uv}^- = \tilde{S}_{uv}/\tilde{S}_{AAI}$ (relative to the anti-ideal) and $\widetilde{K}_{uv}^+ = \tilde{S}_{uv}/\tilde{S}_{AI}$ (relative to the ideal). After defuzzification using the Center of Area (CoA) method, a non-linear utility function $F(K_{uv})$ is synthesized. This function integrates intermediate balance functions $f(K_{uv}^-)$ and $f(K_{uv}^+)$ to provide a robust compromise index. This methodology is specifically chosen for its high resistance to the "rank reversal" problem, ensuring that the addition or removal of an alternative does not arbitrarily change the relative ranking of the remaining options.

$$F(K_{uv}) = \frac{K_{uv}^+ + K_{uv}^-}{1 + \frac{1-f(K_{uv}^+)}{f(K_{uv}^+)} + \frac{1-f(K_{uv}^-)}{f(K_{uv}^-)}}. \quad (3)$$

**Case Study and Results.** The model was tested for an open parking lot ($T = -20^{\circ}C$, heavy snowfall). Ten alternatives (Mag, Ultrasonic, Radar) were evaluated across 6 criteria ($C_1$ - Accuracy, $C_2$ - Battery, $C_3$ - Range, $C_4$ - Cost, $C_5$ - Latency, $C_6$- Installation).

**Filtering:** Ultrasonic sensors ($S_4 - S_6$) were excluded as their adjusted accuracy dropped to $\approx$ 40% due to snow interference ($\delta_{13} \approx 0.4$).

**Ranking:** Fuzzy BWM identified Accuracy ($w \approx 0.32$) and Battery Life ($w \approx 0.24$) as priorities. The final ranking is presented in Table 1.

Table 1

**Final ranking results of sensor nodes**

| **Rank** | **Alternative** | $K_{uv}^-$ | $K_{uv}^+$ | **Index** $F(K_{uv})$ |
|---|---|---|---|---|
| **1** | $S_7$ | **1.674** | **0.789** | **0.812** |
| 2 | $S_3$ | 1.632 | 0.778 | 0.765 |
| 3 | $S_8$ | 1.595 | 0.756 | 0.720 |
| 4 | $S_9$ | 1.550 | 0.710 | 0.680 |
| 5 | $S_1$ | 1.540 | 0.690 | 0.621 |

The radar node $S_7$ is the optimal choice. Although more expensive than magnetometers, it maintains superior accuracy in snow and compensates for battery degradation better than $S_3$. Sensitivity analysis confirms that $S_7$ remains the leader in 4 out of 5 scenarios, proving model robustness.

**Conclusion.** The proposed hybrid Fuzzy BWM-MARCOS model provides a mathematically justified tool for IoT hardware selection. By integrating environmental degradation functions, the model shifts from static "datasheet" selection to dynamic "context-aware" decision-making. The high correlation ($\rho \approx 0.865$) across weighting scenarios confirms its reliability for smart city infrastructure design.

## References


1. J. J. Barriga, J. Sulca, J. L. León, A. Ulloa, D. Portero, R. Andrade, and S. G. Yoo, "Smart parking: A literature review from the technological perspective," *Appl. Sci.* **9**(21), 4569 (2019).
2. S. Z. Marshoodulla and G. Saha, "SDIoTPark: A data analytics framework for smart parking using SDN based IoT," *IEEE Internet Things J.* **11**(11), 20030–20039 (2024).
3. M. Balfaqih, W. A. Jabbar, M. Khayyat, and R. Hassan, "Design and development of smart parking system based on fog computing and Internet of Things," *Electronics* **10**(24), 3184 (2021).
4. J. Rezaei, "Best-worst multi-criteria decision-making method," *Omega* **53**, 49–57 (2015).
5. S. Guo and H. Zhao, "Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications," *Knowledge-Based Syst.* **121**, 23–31 (2017).
6. Ž. Stević, D. Pamučar, A. Puška, and P. Chatterjee, "Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS)," *Comput. Ind. Eng.* **140**, 106231 (2020).
7. M. Stanković, Ž. Stević, D. K. Das, M. Subotić, and D. Pamučar, "A new fuzzy MARCOS method for road traffic risk analysis," *Mathematics* **8**(3), 457 (2020).
8. S. Kumar, S. Bhaumik, L. Patnaik, S. R. Maity, and V. Paleu, "Application of integrated BWM fuzzy-MARCOS approach for coating material selection in tooling industries," *Materials* **15**(24), 9002 (2022).

# ROBUST INFORMATION TECHNOLOGY FOR MODELING AND ADAPTIVE CONTROL OF UAV RADIO LINKS UNDER JAMMING CONDITIONS

**Liventsev S.P.**
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**Abstract.** This paper proposes a robust information technology framework for modeling and adaptive control of UAV communication links under adaptive jamming. A stochastic autoregressive model of interference and a minimax optimization formulation are developed to ensure guaranteed system performance under worst-case conditions. A predictive interference estimation method is introduced to enable proactive adaptation. Simulation results demonstrate a SINR gain of 1.5–2.3 dB and a BLER reduction of up to 18% compared to conventional adaptive strategies. The proposed approach is applicable to SDR-based multi-domain communication systems.

**Keywords:** UAV, cognitive radio, minimax optimization, adaptive control, anti-jamming.

**Introduction.** Modern UAV communication systems increasingly operate in dynamic electromagnetic environments characterized by adaptive interference, spectrum congestion, and rapidly varying propagation conditions. In multi-domain UAV–UGV–USV communication scenarios, radio links are affected not only by fading and noise, but also by intelligent jamming capable of modifying its behavior according to observed network activity. Recent advances in software-defined radio (SDR), cognitive radio, and AI-based spectrum adaptation have significantly improved communication flexibility; however, many existing adaptive methods remain based on average-case optimization and do not guarantee stable operation under worst-case interference conditions.

Recent studies published during 2022–2026 demonstrate growing interest in machine-learning anti-jamming techniques, predictive spectrum control, and intelligent SDR-RAN architectures. Nevertheless, the problem of robust adaptive control under non-stationary adversarial interference remains insufficiently investigated. Therefore, the development of robust information technologies capable of ensuring reliable UAV communication under adaptive jamming conditions is an important scientific and practical task. In this work, a minimax-based adaptive framework combining stochastic interference modeling and predictive interference estimation is proposed for proactive SDR system reconfiguration under adversarial electromagnetic conditions.

**Work goal.** The goal of this work is to develop a robust information technology framework for modeling and adaptive control of UAV communication links under active electronic countermeasures. The proposed approach is focused on ensuring stable communication quality and reliable SDR system operation under worst-case interference conditions.

To achieve this goal, the following tasks are addressed:

- development of a stochastic interference model;
- formulation of a minimax optimization problem;
- development of predictive interference estimation;
- evaluation of system performance using simulation.

**Problem statement.** Let the communication system configuration be defined by the vector:

$$u = \{f, B, P, M, R_c, N_{FH}\},$$

where: $f$ – carrier frequency; $B$ – bandwidth; $P$ – transmit power; $M$ – modulation scheme; $R_c$ – coding rate; $N_{FH}$ – number of frequency hopping channels.

The jammer strategy is denoted as $j$.

System performance is described by a quality function:

$$Q = Q(\text{SINR}, \text{BLER}, E_b, T),$$

where: $SINR$ – signal-to-interference-plus-noise ratio; $BLER$ – block error rate; $E_b$ – energy per bit; $T$ – latency.

The robust optimization problem is formulated as:

$$\max_{u \in U} \min_{j \in J} Q\,(u, j). \tag{1}$$

This formulation ensures the selection of system parameters that maximize performance under worst-case interference.

**Main part.**

**1. Stochastic interference modeling.**

The interference process is modeled using an autoregressive model:

$$j(t) = \alpha j(t-1) + w(t), \tag{2}$$

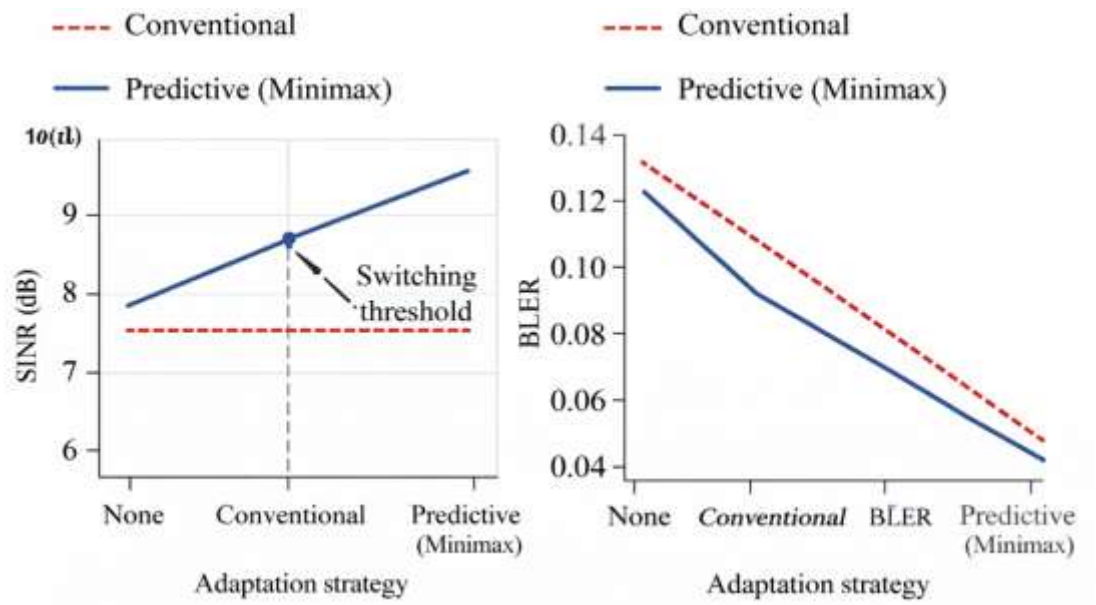
where: α – correlation coefficient; $w(t)$ – white noise.

This model reflects the temporal dynamics of adaptive jamming and enables short-term prediction of interference behavior.

**2. Performance analysis and adaptive control.**

The proposed minimax strategy uses the predicted interference state to select SDR parameters that provide the best guaranteed communication quality under adverse conditions. In contrast to conventional adaptive control, which reacts after degradation of link quality, the proposed approach performs proactive reconfiguration based on the estimated interference dynamics.

To evaluate the effectiveness of the proposed method, three adaptation strategies are compared: conventional fixed-parameter operation, reactive adaptive control, and predictive minimax adaptation. The comparison is performed using SINR and BLER as the main performance indicators. The obtained results are illustrated in Fig. 1, where the proposed strategy demonstrates improved link stability under adaptive jamming conditions.




a) b)

Fig. 1. Performance of adaptive strategies under jamming: (a) SINR versus adaptation strategy; (b) BLER versus adaptation strategy

As shown in Fig. 1(a), the proposed minimax adaptive strategy provides a stable SINR improvement compared to conventional adaptive approaches, especially under strong interference conditions. The switching region between adaptation modes corresponds to the interference level at which predictive control becomes more effective than reactive adaptation.

Fig. 1(b) demonstrates that predictive interference estimation and proactive SDR reconfiguration reduce BLER by up to 18% under non-stationary jamming conditions. The obtained results confirm that the proposed approach improves communication robustness and maintains more stable system operation in dynamically changing electromagnetic environments.

**3. Interpretation of results.**

The combined analysis confirms that:

- SINR improvement leads to a direct reduction in BLER;
- predictive adaptation shifts system operation to a more stable region;
- minimax optimization ensures robustness under worst-case interference.

**Conclusions.** A robust information technology framework for modeling and adaptive control of UAV radio links under adaptive jamming conditions has been developed. The proposed approach combines stochastic interference modeling, predictive estimation, and minimax optimization to ensure stable communication quality under worst-case interference scenarios.

Simulation results demonstrate that proactive SDR reconfiguration improves SINR stability and reduces BLER compared to conventional adaptive strategies. The developed framework can be applied in SDR-based UAV communication systems and extended to multi-domain UAV–UGV–USV networks operating in adversarial electromagnetic environments.

## References


1. S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” IEEE JSAC, 2005. doi:10.1109/JSAC.2004.839380
2. H. Zhang et al., “Spectrum sharing for UAV communications in cognitive radio networks,” IEEE Wireless Communications, vol. 29, no. 1, pp. 84–91, 2022. doi:10.1109/MWC.001.2100105
3. J. Park et al., “Multi-domain UAV relay networks with adaptive spectrum coordination,” IEEE Access, vol. 10, pp. 21544–21557, 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3145678
4. Y. Liu et al., “Deep reinforcement learning for anti-jamming communications,” IEEE Transactions on Communications, vol. 71, no. 2, pp. 1123–1138, 2023. doi:10.1109/TCOMM.2022.3214567
5. X. Chen et al., “AI-driven adaptive spectrum management for SDR networks,” IEEE Network, vol. 38, no. 1, pp. 55–62, 2024. doi:10.1109/MNET.2023.3321458
6. M. Alsenwi et al., “Intelligent anti-jamming strategies for UAV communication systems,” IEEE Access, vol. 12, pp. 44122–44137, 2024. doi:10.1109/ACCESS.2024.3372145
7. S. Liventsev, “Multi-User Subscriber Identification Using Turbo Codes on Programmable Radio Platforms,” Research Square, 2026. doi:10.21203/rs.3.rs-9556780/v1
8. S. Liventsev, “Blind Physical-Layer Identification of Users in Multi-User SDR Systems via Sequential Estimation of Turbo Code Parameters,” Research Square, 2026. doi:10.21203/rs.3.rs-9556550/v1
9. Y. Wang et al., “Predictive interference estimation for cognitive UAV networks,” Sensors, vol. 25, no. 3, pp. 1442–1458, 2025. doi:10.3390/s25031442
10. K. Sharma et al., “Robust minimax resource allocation for adversarial wireless environments,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 1, pp. 988–1002, 2025. doi:10.1109/TVT.2024.3471123

# INFORMATION TECHNOLOGIES IN RESEARCH OF FUNCTIONAL STABILITY OF HYBRID ENERGY SYSTEMS

**Lobunko O., Legen L., Asieiev M., Lobunko D.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The authors' analysis of the development trends of power plants, the role and methods of implementing modern information technologies to ensure the functional stability of hybrid power systems allowed to substantiate the architecture of intelligent monitoring systems, the use of "digital twins" technologies and machine learning algorithms for predicting and parrying failures. It was determined that the integration of information technologies allows not only to identify the degradation of the defining gas-dynamic and electrical parameters of the components of the hybrid power plant of a vehicle at the early stages, but also to provide adaptive resource management in conditions of critical thermomechanical damage and electrochemical operational degradation of the properties of structural materials.

**Keywords**: Energy System, Functional Resilience, Digital Twin, Artificial Intelligence, Anomaly Detection, Filtration, Reconfiguration.

**Introduction**. Hybrid technologies are becoming increasingly relevant in modern vehicles (automobiles, aircraft, space vehicles), as they combine the advantages of different energy sources, contributing to reduced fuel consumption, reduced emissions of harmful substances and improved performance. This leads to a sharp increase in the complexity of hybrid power systems (HPS), which increases the risk of vulnerability to destructive influences under expected operating conditions. Functional stability is understood as the ability of a system to maintain its critical functions even in the presence of failures of individual components or external interference. Traditional methods of physical redundancy are becoming insufficient due to restrictions on mass and dimensions, which makes the use of information methods for parrying failures relevant.

**The purpose of the work** consists in the development and research of a complex of information technologies based on machine learning methods and the concept of digital twins to increase the level of functional stability of hydroelectric power plants by ensuring intelligent monitoring, detection of electrical and gas-dynamic anomalies and adaptive reconfiguration in conditions of operational degradation of component properties or occurrence of failures.

**Formulation of the problem**. There is an urgent need to move from passive (physical) redundancy to active intelligent functional resilience. The issues of integrating large amounts of telemetric data in real time and creating intelligent systems capable of making decisions under conditions of high uncertainty remain unresolved.

**Solving the problem**. A mathematical apparatus is proposed that covers both the physical processes of energy conversion and the logical-informational processes of decision-making and implementation. A multi-level information structure is used to study and support the functional stability of a hydroelectric power plant. The use of mathematical models (digital twins) operating in parallel with a real hydroelectric power plant allows comparing "reference" $\vec{x}_M$ parameters with actual $\vec{x}$. In the event of a failure of a HPS component, the information system based on a multi-agent approach instantly redistributes the load. Priority is given to critical systems (navigation, control), while secondary consumers (lighting) are temporarily disconnected. Artificial intelligence algorithms solve the task of predicting and detecting arc discharges in the wiring, which are difficult to detect with standard fuses, as well as adjusting the parameters of voltage regulators in real time depending on changing operating conditions.

The proposed information structure includes 5 main levels. The Sensor level collects and processes input data. At this level, signal approximation and filtering models are used to separate the useful signal from noise. The Kalman filter is used to estimate the state of a dynamic system under noisy measurement conditions. To implement the concept of functional stability in *Python*, an object-oriented approach is used, where each level of the information structure is represented by

a separate module. The code combines data filtering, anomaly detection, and HPS reconfiguration logic. Using the developed program, the influence of different values of *Q* and *R* on the stability of filtering was analyzed (Fig. 1). Simulations were performed with different values of *Q*, *R*, and graphs of the filtered voltage were constructed for each scenario to demonstrate their influence and estimate RMSE.

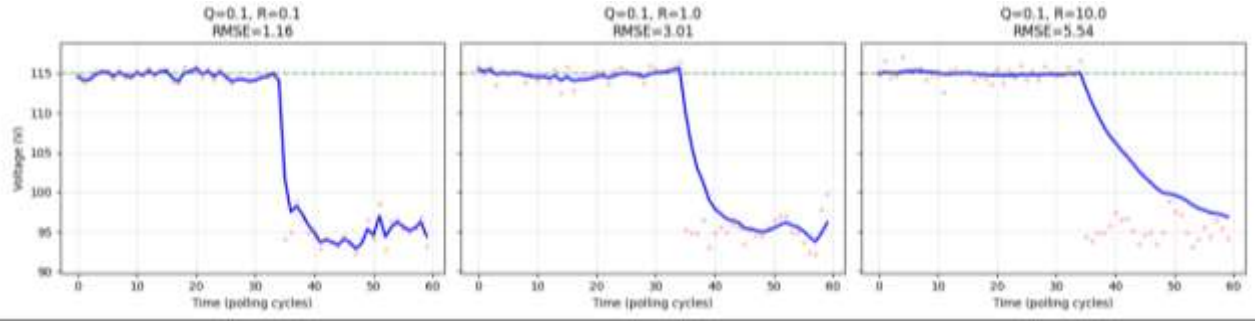



Fig. 1. Simulation results

At the *Analytical level*, anomaly detection is performed. Here, models classify the current technical state of the system as "Normal" or "Anomaly". As a mathematical tool, the support vector method is used, and a hyperplane is formed to identify the states of the HPS in the multidimensional parameter space:

$$f(x) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b\right), \quad (1)$$

$K(x_i, x)$ – a function that allows you to detect nonlinear relationships between current surges and potential short circuits. At the Prognostic level, digital twins and the prediction of operational degradation of determining parameters are implemented. In addition, models at this level compare parameters $\vec{x}_M$ with actual $\vec{x}$ and predict the residual performance of HPS components. Transitions between degradation states are also modeled:

$$P(S_{n+1} = j, T_{n+1} - T_n \leq t | S_n = i) = Q_{ij}(t), \quad (2)$$

$Q_{ij}(t)$ – transition kernel, which determines the probability of the system transitioning from state *i* to failure state *j* in time *t*. This allows the system to "predict" a failure before it actually occurs. At the Executive level, reconfiguration and control of the intelligent system are implemented. At this level, decisions are made on energy redistribution using the mathematical apparatus of multi-criteria optimization of the objective function. The task of network reconfiguration (when receiving signs of a HPS component failure) is described as minimizing energy losses while maximizing consumer priority:

$$F = \sum_{p \in P} w_p L_p \rightarrow \max, \quad (3)$$

under restriction$\sum L_p \leq P_{avail}$ $w_p$ – weighting factor (priority) of the consumer ($w$ = 1,0 for traffic control system, $w$ = 0,1 for lighting); $L_p$ – consumer connection status {0, 1}; $P_{avail}$ – available power of working sources.

Level of intellectual adaptation. For complex HPS, the apparatus of neural network models with reinforcement is used. The mathematical model implements the Bellman equation (***Q***-learning). The agent (information system) learns to choose a control strategy $\boldsymbol{\pi}$ that maximizes the stability function:

$$Q(s, a) = R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a'), \quad (4)$$

$R(s, a)$ – award for maintaining the operability of critical HPS units; $\gamma$ – discount factor for future risks.

These mathematical models together create an intellectual circuit that ensures the survivability of the HPS even in the event of physical damage to individual components (Fig. 2).

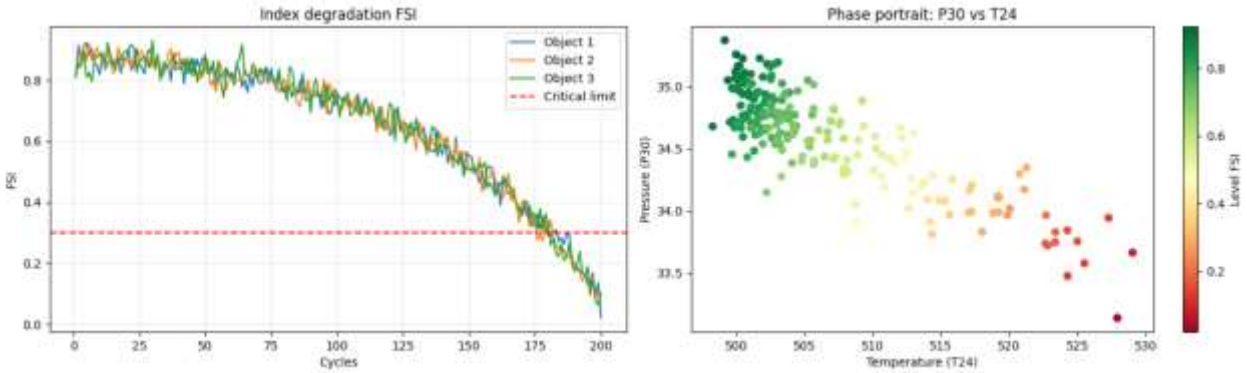



Fig. 2. Results of monitoring the functional stability of the HPS energy system

**Conclusion**. The development of information technologies contributes to the transformation of concepts for ensuring the reliability and safety of vehicle traffic. The transition from passive physical redundancy to intelligent functional stability allows: (I) to reduce the mass of power equipment by eliminating redundant lines; (II) to increase the survivability of the vehicle in extreme situations; (III) to implement modern maintenance/repair strategies. It has been proven that the introduction of physically informed neural networks into the monitoring circuit allows to increase the accuracy of identification of parametric failures by 15-20% compared to classical machine learning methods. It has been established that dynamic redistribution of power between electrical and mechanical subsystems based on predictive data allows extending the term of functional suitability of HPS by 12-18% without the risk of emergency situations. A promising direction of further research is the development of a system for ensuring cyber resilience of power networks, since the deep integration of information technologies creates risks of unauthorized interference in HPS control algorithms.

## References


1. Moir, I., & Seabridge, A. (2021). *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. John Wiley & Sons.
2. Zhang, Y., & Liu, J. (2025). Machine Learning Applications in Fault Diagnosis of Aircraft Power Distribution Networks. *Journal of Aerospace Information Systems*, 22(1), 45-58.
3. Emadi, A., & Ehsani, M. (2023). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design* (4th ed.). CRC Press.
4. Severson, K. A., et al. (2021). "Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation." *Nature Energy*.
5. Mykhailyshyn, M., Lobunko, O. (2026). Small Turbojet Engine Monitoring System. In: Sensors, Devices and Systems. SDaS 2025. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 1570. Springer.
6. Lobunko, O. (2024). Scientific and practical aspects of flight safety. European Science, 1(sge26-01), 104-139.
7. Iskra, O., Lobunko, D., Lobunko, O. (2023). Research of mechanisms of destruction and protection complex thermodynamic systems. *European Science*, *1*(sge23-01), 60-77.

# MODELLING THE PROCESS OF SELECTING PARTNERS FOR A VIRTUAL ENTERPRISE TO FULFIL A PORTFOLIO OF ORDERS FOR HIGH-TECH PRODUCTS

**Lutai L., Fedorenko M.**
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Abstract**. The subject of this study is the processes involved in preparing for the production of high-tech products. Production preparation requires organisational, economic and technological measures to ensure the transition to mass production, taking into account the requirements of Industry 5.0 and utilising scientific and technological innovations. Preparation is carried out with the aim of effectively mastering a new mass-produced product, introducing modern robotic equipment and information technologies, including the Internet of Things, and mastering new forms of production organisation. In the context of martial law, economic instability and global competition, there is a need to shorten the production preparation phase and the life cycle of high-tech product development. A new complex product may comprise various types of components: reusable components, combined components containing innovative elements, as well as new innovative components that ensure its competitiveness. Production planning must be carried out for each component. Among modern approaches to production organisation, the creation of a virtual enterprise is particularly relevant, within which companies collaborate to implement a specific project for the manufacture of high-tech products.

**Keywords**: High-Tech Products, Life Cycle of New Technology Creation, Life Cycle Reduction, Technological Preparation of Production, Virtual Enterprise, Selection of Suppliers.

**Introduction**. Current trends require the creation of products of proper quality, reducing the impact on the environment, as well as reducing energy and other types of resources, increasing the informativeness of the process of monitoring the state of technological systems, increasing the degree of detection and tracking of the causes of defects in the creation of products. Accordingly, the requirements for management processes have increased. To obtain current data, it is necessary to plan processes for monitoring and regulating characteristics and production operations related to the life cycle of product creation and the life cycle of equipment [1]. It is advisable to use a new organizational structure of production based on virtualization and the active use of digital technologies.

**The purpose of the work** is to examine the production preparation stage for complex technical products, with a view to defining the structure and composition of the main functional modules of the production preparation process using a component-based approach, and to develop a model for selecting partners for a virtual enterprise to fulfil a portfolio of orders for the manufacture of high-tech products.

**Formulation of the problem**. Given the state of war, economic instability and the existing demand for innovative military products, there is a need to look for new approaches to organizing high-tech production. Therefore, the proposed study examines the process of preparing for production with the aim of reducing the duration of this stage of the life cycle of creating innovative products.

**Solving the problem**. The volume of work on production preparation is significantly influenced by certain factors. One of the important factors is the level of innovation and complexity of the product being manufactured, and the type of production organization. This publication considers the preparation of serial production. Based on the component structure of a complex technical product, each component of a certain level of decomposition requires the use of a set of technical and technological solutions, requires the availability of equipment and qualified personnel. The complex technical product being created may include various types of components: reusable components (tested technical solutions), combined components that contain elements of innovation (may require adaptation), as well as innovative components that ensure the competitiveness of the product being created. Based on the formed component multi-level architecture of the product being created, it is necessary to build a structure of the necessary functional modules for production preparation, taking into account the presence of various types of components in the composition of a high-tech product.

When creating a complex technical system, a multi-level component architecture of the product is formed with a reasonable selection of existing components. In addition, a set of design actions is formed to create new innovative components, taking into account the development time for a new component, as well as indicators of cost, quality, competitiveness, innovation and risks [2].

In this study, it is proposed to carry out the production preparation processes using a virtual enterprise. An industrial enterprise of a machine-building profile can serve as a model of a virtual enterprise. A virtual enterprise can use the production capacities of other enterprises that have a shortage of orders. Among the advantages of using a virtual enterprise, the following can be distinguished: a new flexible form of organization based on the market; the ability to adapt in a global economy; the creation of high-quality products with less capital investment; reduction of production time and cost; the possibility of implementing innovative technologies and services that become less expensive due to the combination of various resources in the environment of electronic communications; network infrastructure, etc. [3]

A virtual instrument-making enterprise can be organized on the basis of a classical enterprise specializing in the manufacture of high-tech products of a certain type. Therefore, as a result of the component architecture of the product being created obtained at the design stage, a specification is formed for each of the components, and the norms of raw material and necessary materials are determined. Raw material and material costs are determined for: main production; auxiliary needs (manufacturing of tools and technological equipment, testing of products, equipment adjustment, packaging of finished products, manufacturing of samples of new equipment, manufacturing of non-standard equipment, conducting R&D and R&D); repair and maintenance needs of fixed assets.

Thus, for the preparation of production, it is proposed to use a multi-level component architecture of the created product. If the manufacture of a separate component at a certain level of system decomposition is not appropriate, then in this case the virtual enterprise searches for the necessary new components and organizes their supply. In this case, it is necessary to take into account the type of the required component (a component from past experience, a combined component or an innovative one).

The structure of the proposed multi-level model of functional modules, utilising a component-based product architecture for the preparation of high-tech manufacturing, is presented in [4]. For effective management of a virtual enterprise, it is necessary to promptly distribute orders among participating enterprises (partners). The logistics of the life cycle of creating high-tech products under virtual production conditions can be divided into the following main stages: formation of an order portfolio, preparation for production, production, and product sales. Important for a virtual enterprise is the formation of a portfolio of orders and further preparation of production for the implementation of this portfolio. The formation of a portfolio of orders is influenced by the following indicators: duration T, costs of organizing production Z, quality P, competitiveness Q, innovativeness H, risk of unsuccessful organization of production R. It is necessary to take into account the level of detail of the product, which is determined within the framework of a multi-level component model of production preparation [4].

To form a portfolio of orders, it is proposed to involve experts for evaluation according to selected indicators (T, Z, P, Q, H, R), since conditions of uncertainty are possible. Each order $O_i$ from the portfolio of orders of a virtual enterprise can be evaluated by the degree of importance and then a priority series can be formed, at the beginning of which is the most relevant order, and at the end the less important order: $O_i$, $O_i$, …, $O_m$. Next, it is necessary to rank the indicators by importance (T, Z, P, Q, H, R). Let for each order $O_i$ possible set of alternatives N i on the selection of possible production capacities for the organization of high-tech production. Taking into account the contradictions of the indicators T, Z, P, Q, H, R, for the selection of a specific composition of a virtual enterprise that will participate in the implementation of $O_i$, one can use the lexicographic ordering of the options for the composition of producers.

In the case of a large number of possible options for choosing productions to fulfill the order portfolio of a virtual enterprise, it is advisable to use the method of integer linear programming with Boolean variables $x_{ij}$, where i is the order number, j is the possible composition of manufacturers

selected to organize the order fulfillment. Then the indicators for assessing the fulfillment of the order portfolio of a virtual enterprise will have the following form:

$$T = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot t_{ij}, \quad Z = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot z_{ij}, \quad P = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot p_{ij},$$
$$Q = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot q_{ij}, \quad H = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot h_{ij}, \quad R = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} \cdot r_{ij}, \tag{1}$$

where

$$x_{ij} = \{ 1, the\ selection\ of\ the\ j-th\ composition\ of\ manufactures\ to\ fulfil\ the\ i-th\ order;\ 0, otherwise; \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} x_{ij} = 1, \tag{3}$$

which means the mandatory choice for fulfilling the i-th order of a specific j-th warehouse of manufacturers;

$t_{ij}$ is quantitative assessment by experts of the duration of the i-th order execution when choosing the j-th composition of manufacturers;

$z_{ij}$ is quantitative assessment of costs for organizing (adapting) the j-th warehouse of manufacturers to fulfil the i-th order;

$p_{ij}$ is quantitative assessment of the quality of the organization of the j-th warehouse of producers to fulfil the i-th order ;

$q_{ij}$ is quantitative assessment of the competitiveness of the j-th set of manufacturers for the fulfillment of the i-th order ;

$h_{ij}$ is quantitative assessment of the innovativeness of the j-th producer in the composition for the fulfillment of the i-th order ;

$r_{ij}$ is the risk associated with the inclusion of the j-th warehouse of manufacturers to fulfil the i-th order.

**Conclusion**. Production planning is carried out on the basis of a virtual enterprise comprising a network of geographically dispersed subcontractors (partner enterprises) that collaborate during the production process and communicate via telecommunications. A virtual enterprise requires a virtual office to manage production planning, compile the order portfolio and allocate orders among partner manufacturing enterprises. This is achieved by applying the model proposed in this study for selecting partners for a virtual enterprise to fulfil the order portfolio for high-tech manufacturing.

## References


1. Xiao, H., Zhou, H., Hu, W., Liu, G.-P.: Design and implementation of an interactive networked condition monitoring strategy for plant-wide production equipment toward Industry 4.0. *Expert Systems with Applications*, 2024, vol. 254, article no. 124376. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.124376.
2. Fedorovich, O., Lutai, L., Kompanets, V., Bahaiev, I.: The Creation of an Optimisation Component-Oriented Model for the Formation of the Architecture of Science-Based Products. Lecture Notes in Networks and Systems [Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023], 2024, vol. 996, pp. 415-426. DOI: 10.1007/978-3-031-60549-9_31.
3. Sheng, M. L., Saide, S.: Supply chain survivability in crisis times through a viable system perspective: Big data, knowledge ambidexterity, and the mediating role of virtual enterprise. *Journal of Business Research*, 2021, vol. 137, pp. 567-578. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.08.041.
4. Lutai, L.: Modeling processes for preparing high-tech production using the virtual enterprise concept. *Aerospace Technic and Technology*, 2025, No. 2(202), pp. 67-80. DOI: 10.32620/aktt.2025.2.07.

# THE EDITOR FOR PREPARATION AND SUPPORT OF UNMANNED AUTONOMOUS MISSIONS

**Mysiura Yu., Yarmilko A.**
Bohdan Khmelnytsky National University of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The study proposes the concept of an editor for autonomous missions of unmanned platforms. The use case of the proposed editor was analyzed. According to the results of the analysis, the formalized structure of the proposed editor is presented, and the algorithm of its functioning is described. To implement the editor, the authors propose to use the Unity game engine, into which data from a geographic information system is integrated. The properties of such an approach were analyzed. The components of the mission editor are considered, and the path of data flow from the operator to the unmanned vehicle and vice versa is also described.

**Keywords**: Unmanned Platforms, Autonomous Unmanned Mission, Unmanned Mission Editor, Unity, Geoinformation Systems.

**Introduction**. Unmanned platforms are currently being used in an increasing number of tasks. Among these tasks are those that are associated with the processing of a certain geographical area, which is accompanied, for example, by the collection of certain information in it or the performance of other applied tasks. At the same time, ensuring the autonomy of the mission requires the platform to independently take into account not only a priori information about significant objects and obstacles, but also that which may appear as a result of monitoring the functional space along the trajectory of its movement [1, 2].

Since unmanned aerial vehicles may not have a permanent communication channel with the operator, there is a need for a specialized editor that will allow the operator not only to determine the starting and ending points and tasks of an autonomous mission, but also to ensure the integration of the results of assessing changes in the current state of the functional space into the formal mission description, as mentioned in [3, 4].

**The purpose of the work** is to propose a concept for a mission editor for unmanned platforms with a formalization of its structure and functioning algorithm.

**Formulation of the problem**. The analysis of the structure and the flow of data passing through the proposed mission editor.

**Solving the problem**. The mission editor proposed in this study acts as an intermediary program between the operator involved in the preparation and/or support of an unmanned mission and the unmanned vehicle. Since unmanned missions are deployed in a certain area, it is advisable to use a terrain map for spatial binding of individual components of the mission and its visualization [5, 6]. Information about the terrain can dynamically change and be supplemented with data of various types. Therefore, the editor should have a structure that will provide the possibility of adding new information and functionality without violating the integrity of previously stored information.

The structure of the mission editor is generally described by several layers. The first layer is the one with which the operator (user) interacts. The user interface has the form of a map, which is built on the basis of GIS data. This map contains a layer with objects that are contained in the working area, and which can positively or negatively affect the course of the mission. The set of objects is supplemented with information that the unmanned vehicle receives during the mission. The raw information from the vehicle must be converted to a form suitable for presentation in GIS, for which the information conversion unit, which contains the necessary modules for this, serves.

Thus, the overall architecture of the mission editor uses the MVC (model-view-controller) principle to maintain modularity. Its block diagram is shown in Fig. 1.

To implement such an editor, it is advisable to use the functionality of a game engine, supplemented by the ability to embed GIS data to emulate the trajectory of an unmanned aerial vehicle. One of the options for such an engine is Unity, which allows integration with a geographic information system using the ArcGIS Maps SDK extension. This software provides tools for building a two- and three-dimensional map, and also allows you to add a controlled object to

emulate the bypass of a certain functional area related to the performance of the mission. ArcGIS Maps SDK can be based on data from ArcGIS Pro - software for working with geographic information systems data. In this case, there is the possibility of working together with the map. The condition for using this mode is that the co-editing participants belong to the same organization – a user group registered in ArcGIS Online [7]. With this approach, users receive the most up-to-date information about the geographical area, as well as a full set of tools for analyzing various terrain parameters. In this case, you need to manually export the map of the area where the drone mission is planned to be performed in a format supported by the engine. Another option is to create the map of the area directly through the engine interface. This may be easier for users, but it may result in the loss of the 3D map layer for the desired area.

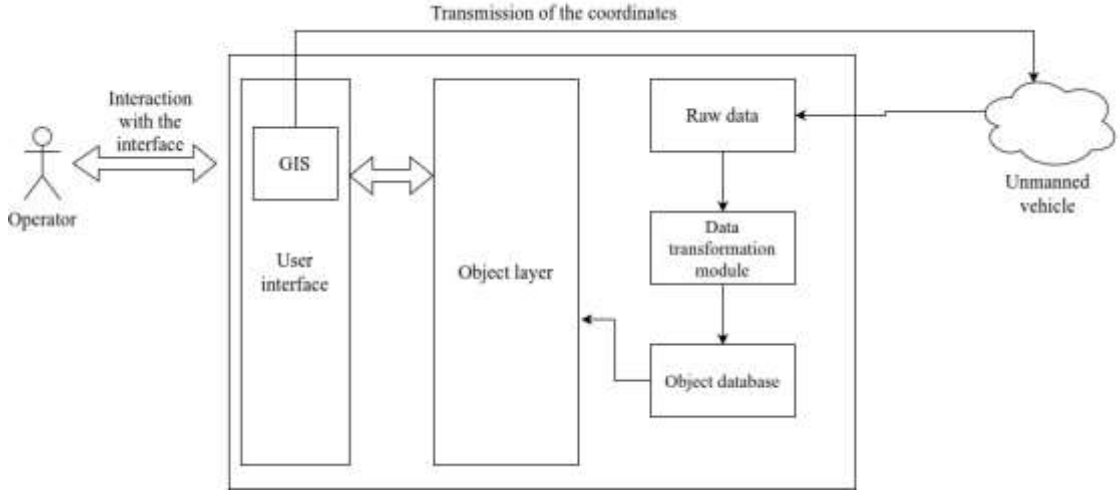



Fig. 1. The structure of the unmanned mission editor

**Conclusion.** The analysis conducted in this study made it possible to present the concept and structure of the editor of unmanned autonomous missions. A method of implementing the editor by integrating data and tools of the geographic information system on the Unity platform was also proposed. The advantages and disadvantages of this approach to creating a toolkit for preparing applied tasks for autonomous testing by unmanned platforms were analyzed.

## References


1. F. C. Conti, C. Santoro, and F. F. Santoro, “Twinflie: A digital twin uav orchestrator and simulator,” in 2023 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress DASC/PiCom/CBDCom/CyberSciTech), 2023, pp. 0258–0263. DOI: 10.1109/DASC/PiCom/CBDCom/Cy59711.2023.10361478.
2. Tanaka K. A Survey on XR-Based Drone Simulation: Technologies, Applications, and Future Directions. Drones and Autonomous Vehicles. 2025; 2(3):10015. https://doi.org/10.70322/dav.2025.10015
3. Mariusz Szóstak, Abdul-Majeed Mahamadu, Abhinesh Prabhakaran, David Caparros Pérez, and Kofi Agyekum, “Development and testing of immersive virtual reality environment for safe unmanned aerial vehicle usage in construction scenarios,” *Safety science*, 2024, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106547.
4. Emami, Yousef, et al. "On the use of immersive digital technologies for designing and operating UAVs." *arXiv preprint arXiv:2407.16288* (2024).
5. Nikolaos Sarantinoudis, Nikolaos Vitzilaios, and G. Arampatzis, “Applications of Digital Twins in UAVs,” *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2024, doi: 10.1109/icuas60882.2024.10556896.
6. Yousef Emami, Hao Gao, Kai Li, Luis Almeida, Eduardo Tovar, and Zhu Han, "Age of Information Minimization using Multi-agent UAVs based on AI-Enhanced Mean Field Resource Allocation," IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, doi: 10.1109/tvt.2024.3394235.
7. Esri, "Web GIS Mapping Software | Create Web Maps with ArcGIS Online," esri.com. https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview (accessed May 3, 2026).

# ON THE APPLYING BAYESIAN GAME THEORY IN STARCRAFT 2

**Naidon I., Revina T.**
V. N. Karazin Kharkiv National University

**Abstract.** This study presents a computational framework for modeling StarCraft 2 as a Bayesian game with incomplete information. The Selten type-agent representation is applied to reduce the original incomplete-information problem to a standard strategic form. This enables us to use the support enumeration algorithm for Nash equilibrium computation. The ZvP matchup is analyzed using empirical win-rate data from the Aligulac and Spawning Tool databases. We analyze the computational complexity of the algorithm. The results confirm that aggressive strategies dominate in the ZvP matchup, which is consistent with empirical data.

**Keywords:** Bayesian game, incomplete information, Selten representation, Nash equilibrium, support enumeration algorithm, algorithmic game theory.

**Introduction.** The notion of a general Bayesian game was defined and studied by Harsanyi in 1967 [1]. For their study of Bayesian games, John Harsanyi, John Nash, and Reinhard Selten received the Nobel Prize in 1994. There is currently a huge interest in Nash equilibrium for Bayesian games [for ex. 2]

Real-time strategy games such as StarCraft 2 represent a common computational model for decision-making under incomplete information. Players possess private knowledge of their own strategy and race while remaining unaware of their opponent's choices, particularly at the start of a match. The fog-of-war mechanic enforces this information asymmetry, and scouting corresponds directly to Bayesian belief updating. These properties make StarCraft 2 a well-suited environment for applying and validating game-theoretic algorithms. This study proposes a formal computational model of StarCraft 2 as a Bayesian game [1] and evaluates equilibrium strategies based on real match data.

**The purpose of the work** is to formalize StarCraft 2 as a Bayesian game with incomplete information and apply the Selten type-agent representation in order to bring it to a computationally acceptable form. Besides, we compute Nash equilibria using the support enumeration algorithm [3] and analyze the computational complexity of the resulting procedure.

**Formulation of the problem.** The main computational problem is to find a Bayesian Nash equilibrium, that is, a strategy profile such that no player can improve its expected payoff by unilaterally deviating from its chosen strategy [1]. We assume that each player knows his own type, but has only a probabilistic idea of his opponent's type. A Bayesian game is defined by the tuple [1]:

$$G = \langle N, \Theta_i, S_i, p_i, u_i \rangle,$$

where $N = \{1, \dots, n\}$ is the set of players; $\Theta_i$ is the type space of player *i*; $S_i$ is the action set; $p_i(\cdot\,|\theta_i)$ is the belief function of agent $\theta_i$; $u_i: \Theta \times S \to R$ is the payoff function. A strategy for player *i* is a mapping $s_i: \theta_i \to S_i$. Analysis of the Bayesian Nash equilibrium allows us to state the following: direct computation over the entire type space is infeasible, which motivates us to use Selten reduction as a preprocessing step [4].

**Solving the problem.** The Selten type-agent representation [4] transforms the Bayesian game into an equivalent complete-information game by replacing each player with a separate agent for every (player, type) pair. The agent set becomes $N^s = \bigcup_i \theta_i$, each agent retains the original action set, and the payoff of agent $\theta_i$ is defined as the conditional expected payoff of player *i*:

$$U(s_i^{\theta};\, s_{-i}^{\theta}) = \sum_{t_{-i} \in \theta_{-i}} p_i(t_{-i}\,|\theta_i)\;\; u_i\,(\theta_i, t_{-i}, s_i^{\theta}, s_{-i}^{\theta}, t_{-i}),$$

where the symbol *-i* means all players except *i- th* player.

A Bayesian Nash equilibrium of the original game corresponds exactly to an ordinary Nash equilibrium [5] of the resulting Selten game, making standard equilibrium algorithms directly applicable.

Equilibrium computation proceeds in two stages. Firstly, iterated elimination of strictly dominated strategies is applied. For this strategy is removed if another strategy yields a strictly higher payoff against every opponent strategy. This reduction is applied repeatedly until no further eliminations are possible, yielding a smaller matrix on which the second stage operates. Secondly, the support enumeration algorithm [3] is executed on the reduced game. For each candidate pair of supports ( $S_1 \subseteq$ strategies of player 1, $S_2 \subseteq$ strategies of player 2), a system of indifference equations is formulated requiring equal expected payoffs across all active strategies, together with a normalization condition. If the system admits a solution with non-negative probabilities and no strategy outside the support yields a higher payoff, a Nash equilibrium has been found.

The computational complexity of this procedure is analyzed as follows [6]. Let $m$ denote the number of strategies per player after the dominance reduction. Iterated dominance requires $O(m^3)$ comparisons in the worst case. The support enumeration stage iterates over all pairs of supports: for each player there are $2^m - 1$ non-empty subsets, which require $O(4^m)$ candidate pairs. For each pair with support sizes $k_1$ and $k_2$, solving the indifference system via least squares requires $O((k_1 + k_2)^3)$. Verification of the best-response condition requires $O(m)$ per candidate. The overall worst-case complexity is therefore $O(4^m \cdot m)$, which is exponential in the number of strategies.

Let us say some words about the computational complexity of the Nash equilibrium [7, 8]. In general, there are two types of computational complexity. They are polynomial-type (P) and Nondeterministic Polynomial time (NP). In [7] it is shown that finding a classical Nash equilibrium is complete for the class of problems called (Polynomial Parity Arguments on Directed graphs), which is a subclass of NP. Recent work has further established tight inapproximability bounds for PPAD, showing that even approximate Nash equilibria are hard to compute in this class [8].

The model is instantiated for the ZvP matchup as follows:

$$N = \{1, 2\};\ \Theta_i = \{T, Z, P\} \times \{Aggression, Economy, Technology\},$$

yielding 9 type combinations per player; $u_i(\theta, s) \in [0; 1]$ represents the empirical win rate; prior beliefs $p_i(\theta_{-i}|\theta_i)$ are estimated as empirical strategy frequencies from the Aligulac [9] and Spawning Tool [10] databases. In Table 1, the win rate matrix from [9,10] is shown.

Table 1

**Win rate matrix for ZvP [9,10] (probability of Zerg winning)**

| Zerg \ Protoss | P-Aggression | P-Economy | P-Technology |
|---|---|---|---|
| Z-Aggression | 0.50 | 0.56 | 0.52 |
| Z-Economy | 0.47 | 0.49 | 0.51 |
| Z-Technology | 0.49 | 0.53 | 0.50 |

Using a Python program, the equilibrium search process was carried out. Below, we describe the program's implementation and its results.

From Table 1, Z-Aggression strictly dominates all other Zerg strategies across every Protoss column: it outperforms Z-Economy ($0.50 > 0.47,\ 0.56 > 0.49,\ 0.52 > 0.51$) and Z-Technology (dominated by Z-Aggression: $0.50 > 0.49, 0.56 > 0.53, 0.52 > 0.50$). The matrix reduces to a 1×3 game. Support enumeration on the reduced matrix yields a unique pure Nash equilibrium [3]: Zerg selects Aggression with probability *1*, Protoss selects Aggression with probability *1*, with game value *v = 0.50*. Aggression is the most frequently observed strategy for Zerg at 74% of matches, consistent with the theoretical equilibrium.

**Comparison of Theoretical Equilibria with Empirical Date.** We found pure equilibrium. Both players choose Aggression with probability 1. The theoretical strategy distribution for Zerg is $Q = (Q_{Agg}, Q_{Eco}, Q_{Tech}) = (1.0,\ 0.0,\ 0.0)$. Since KL-divergence and $\chi^2$ are undefined at zero probabilities, standard Laplace smoothing with $\varepsilon = 0.05$ is applied: $Q' = (0.90, 0.05, 0.05)$.

Using the empirical frequencies reported in Table 2, we compute the KL-divergence and $\chi^2$ statistic to assess how closely observed play matches the theoretical equilibrium. The value KL-

divergence $D_{KL} \approx 0.11$ is relatively small, indicating that the empirical distribution closely approximates the equilibrium distribution. *The $\chi^2$ test* is used to evaluate the null hypothesis $H_0$: the empirical distribution matches the theoretical one. The result indicates that the distribution differs statistically from the pure equilibrium. Real players do not play a single strategy in 100% of matches.

Table 2

**Empirical strategy frequencies for Zerg in ZvP [9,10] ($n$ = 200 matches)**

| Strategy | $Q_i$ (matches) | $P_i$ (empirical probability) | $E_i$ (expected matches) | $\chi^2$ test |
|---|---|---|---|---|
| Aggression | 148 | 0.74 | 180 | 5.69 |
| Economy | 32 | 0.16 | 10 | 48.40 |
| Technology | 20 | 0.10 | 10 | 10.00 |

**Conclusion.** This study demonstrates that StarCraft 2 can be formally modeled as a Bayesian game with incomplete information [1] and solved using the Selten reduction [4] combined with the support enumeration algorithm [3]. The worst-case complexity of the procedure is $O(4^m \cdot m)$, which is exponential in the strategy count but practically efficient for the proposed game sizes [6]. Analysis of the ZvP matchup identifies a unique pure Nash equilibrium [5] that favors aggressive strategies, consistent with a 74% empirical frequency of Aggression in the observed game. Comparing theoretical equilibrium with empirical data using KL-divergence and the $\chi^2$ test provides a quantitative assessment of the degree to which a player's behavior corresponds to the theoretically optimal solution. The proposed framework is generalizable to all matchups and applicable to other strategic games with incomplete information.

## References


1. Harsanyi J. C. Games with incomplete information played by "Bayesian" players. In: Kuhn H. W. (ed.) *Classics in Game Theory*. Princeton University Press, 2020, pp. 216–288. https://doi.org/10.1515/9781400829156-020
2. Huot S., Edalat A. Pure Bayesian Nash Equilibria for Bayesian Games with Multidimensional Vector Types and Linear Payoffs. *Games*, 2025, *16*(4), 37. https://doi.org/10.3390/g16040037
3. Porter R., Nudelman E., Shoham Y. Simple search methods for finding a Nash equilibrium. *Games and Economic Behavior*. 2008. Vol. 63, No. 2, pp. 642–662. https://doi.org/10.1016/j.geb.2006.03.015
4. Selten R. Reexamination of the perfectness concept for equilibrium points in extensive games. In: Kuhn H. W. (ed.) *Classics in Game Theory*. Princeton University Press, 2020, pp. 317–354. https://doi.org/10.1515/9781400829156-023
5. Nash J. Non-cooperative games. In: Kuhn H. W. (ed.) *Classics in Game Theory*. Princeton University Press, 2020, pp. 14–26. https://doi.org/10.1515/9781400829156-008
6. Li H., Huang W., Duan Z., Mguni D. H., Shao K., Wang J., Deng X. A survey on algorithms for Nash equilibria in finite normal-form games. *Computer Science Review*, 2024, Vol. 51, 100613. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100613
7. Daskalakis C., Goldberg P. W., and Papadimitriou C. H. The complexity of computing a Nash equilibrium. *Communications of the ACM*, 2009, Vol. 52, No. 2. pp. 89-97. https://doi.org/10.1145/1461928.1461951
8. Deligkas A., Fearnley J., Hollender A., Melissourgos T. Pure-Circuit: Tight inapproximability for PPAD. *Journal of the ACM*, 2024, Vol. 71, No. 5, Article 31, pp. 1–48. https://doi.org/10.1145/3678166
9. Aligulac — StarCraft 2 statistics database. http://aligulac.com (Accessed: 28.03.2026)
10. Spawning Tool — StarCraft 2 statistics database. https://lotv.spawningtool.com/ (Accessed: 29.03.2026)

# DEDICATED SOFTWARE FOR MODELLING AND VISUALIZING THE FPV DRONE DYNAMICS USING MATLAB GUI AND A QUATERNION INTEGRATOR

**Nikulin S., Zabolotnyi O., Zabolotnyi V., Siroklyn V., Koshevoy N.**
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. Many existing flight simulators, especially gaming simulators, emphasize visual components at the expense of physical accuracy. They often use simplified models that do not take into account gyroscopic effects or cross-channel control interactions. The software package developed in MATLAB is designed for modelling and interactive research of the rotational dynamics of an FPV drone. The package implements a nonlinear dynamic model that takes into account the torques generated by the motors, the gyroscopic effects of the rotors, reactive torques, and damping. A distinctive feature of the development is the use of quaternions to parameterize the orientation of the aircraft, which eliminates singularities in Euler's equations, and the application of the 4th order Runge-Kutta method for numerical integration. Characteristic flight modes were simulated, and the influence of battery weight and frame geometry on dynamic characteristics was analyzed. The developed complex can be used to test stabilization algorithms, for educational purposes, and as a basis for creating Hardware-in-the-Loop (HIL) test benches.

**Keywords**: FPV Drone, Mathematical Modelling, Rotational Dynamics, Quaternions; Runge-Kutta Method, Interactive Simulation, Gyroscopic Moment.

**Introduction**. The high maneuverability and complex nonlinear dynamics of FPV drones place stringent demands on control systems and their preliminary debugging [1]. Field experiments with real aircraft are associated with a high risk of damage, material costs and time constraints. In this regard, the creation of adequate and visual simulation models is a pressing scientific and technical task [2], allowing for a significant reduction in costs and acceleration of the development process. Modelling the UAV's dynamics is traditionally carried out using two approaches: one based on Newton-Euler equations and the other on Lagrange formalism [3, 4]. Existing simulators range from simple linear models, applicable only in the vicinity of the equilibrium point, to complex nonlinear environments such as Gazebo, JMavSim, or MATLAB/Simulink-based simulators. MATLAB/ Simulink is the de facto standard in scientific research and engineering practice for dynamic systems modelling. Its advantages include a rich set of tools for numerical calculations, powerful visualization capabilities, and the ability to generate code for embedded systems with relative ease. The App Designer environment in MATLAB allows the creation of modern GUIs with a rich palette of controls, which is ideal for creating interactive research testbeds.

**The purpose of the work** is to develop an interactive software complex for modelling and visualizing the rotational dynamics of a quadcopter [5].

**Formulation of the problem**. Many existing simulators often use simplified models that do not take into account gyroscopic effects or cross-channel control interactions. In addition, they are usually 'closed boxes' that do not allow the user to change the physical parameters of the drone or deeply analyze the processes taking place in the system.

**Solving the problem**. In the process of rotational motion modelling, the FPV drone is considered as a rigid body with distributed masses [6-12], and Euler angles (yaw, pitch, roll) are typically used to describe the orientation of a drone in space. However, at large angles and fast rotations, this can lead to singularities in calculations. Therefore, in this work, a quaternion representation of orientation was used [13].

The derivative of a quaternion with respect to time is related to angular velocity by the following equation:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega_q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} q, \quad (1)$$

where $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ – orientation quaternion (unit quaternion); $\omega_q = [0, p, q, r]^T$ – angular velocity matrix.

The total torque $\tau$ from the motors acting on the quadcopter consists of several components: the moment from engine thrust $\tau_{th}$; a reactive torque $\tau_{re}$, caused by resistance to propeller rotation; gyroscopic moment $\tau_{gy}$ and damping moment $\tau_d$.

The positioning of the drone in the roll, pitch and yaw channels can be described by the system of differential equations, which consists of seven variables: three components of angular velocity $\omega$ and four components of the quaternion $q$:

$$\begin{cases} \omega_{k+1=}\omega_k + f_\omega(\omega, M) \cdot dt, \\ q_{k+1=}q_k + f_q(q, \omega) \cdot dt, \end{cases} \quad (2)$$

At each integration step $\Delta t$, four intermediate increments ($k_1$, $k_2$, $k_3$, $k_4$) are calculated for both the quaternion and the angular velocity. This method provides high accuracy and numerical stability for the nonlinear system under consideration [14].

The dedicated software architecture is a single MATLAB script (m-file) built on the principle of a finite state machine. It consists of the initialization module (sets the physical parameters of the drone (mass, geometry, inertial characteristics)), GUI module (creates a window with control and visualization elements), simulation cycle (controls the simulation process (start, pause, stop) and calls the integrator), torque calculation unit (calculates the resulting torque based on the current thrusts and angular velocities), RK4 integrator block (performs numerical integration of dynamic equations), coordinate transformation block (converts quaternions to Euler angles for clarity), and visualization module (updates graphs on the GUI in real time).

The visualization module interface is divided into two main panels (Fig. 1). The left control panel contains: sliders for independently setting the thrust of each of the four engines; fields for entering the step and integration time; control mode selection buttons (‘Manual’, ‘Preset’); simulation control buttons (‘Start’, ‘Pause’, ‘Stop’); elements for saving/loading data. The right panel displays three real-time graphs: Euler angles (roll, pitch, yaw), angular velocities ($p$, $q$, $r$) and engine thrust values.

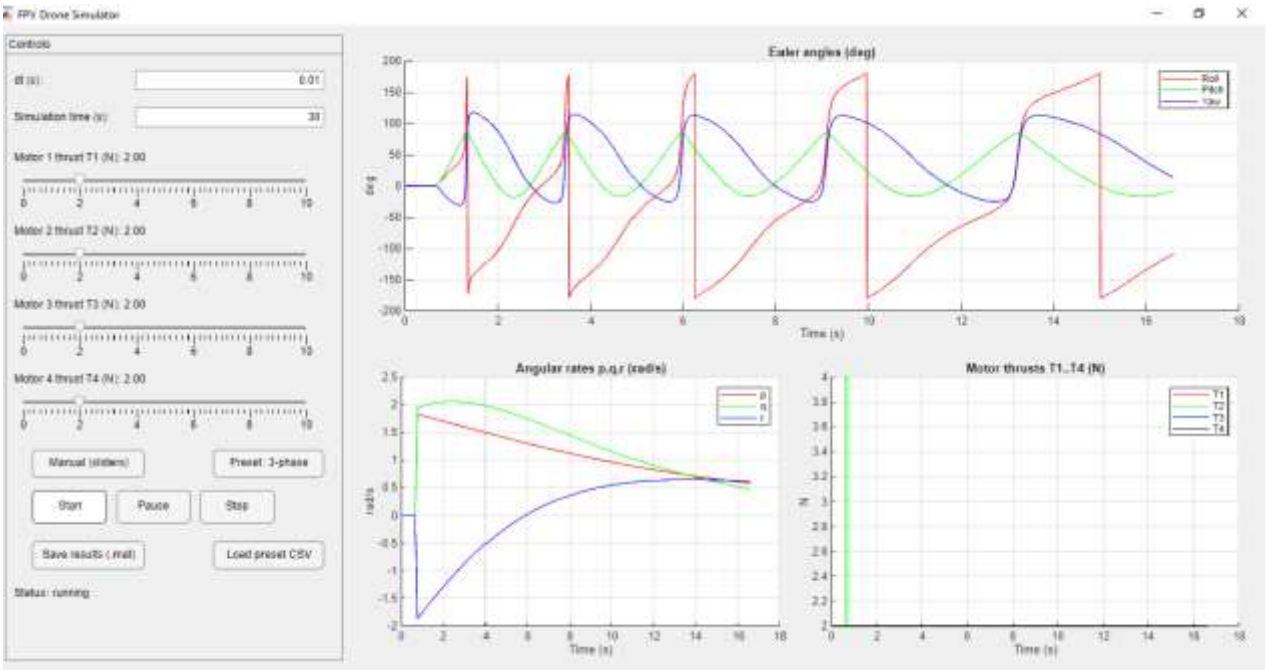



Fig. 1. FPV drone simulation module interface

The simulation runs in a cycle with a fixed step size $\Delta t$. To ensure GUI interactivity and responsiveness, periodic calls to ‘drawnow limitrate’ are used within the cycle, which update the graphs Pitch = $\theta$(t), Roll = $\phi$(t), Yaw = $\psi$(t), as well as the instantaneous values of angular velocities

$\omega_x$, $\omega_y$, $\omega_z$ without placing an excessive load on the processor. A normalized quaternion is used to calculate the orientation, followed by conversion to Euler angles.

**Conclusion**. The developed software package can be used as a basis for creating a Hardware-in-the-Loop (HIL) system. A real drone mounted on a gimbal with 3 degrees of freedom (roll, pitch, yaw) could receive commands from the controller, and data from its IMU (accelerometer, gyroscope) could be fed into the model for correction. Alternatively, the model could generate 'virtual' IMU readings for debugging the flight controller in laboratory conditions. The current model uses simplified linear damping. To improve accuracy, modelling of aerodynamic drag forces proportional to the square of the speed can be added, as well as inductive power, which takes into account the effect of the oncoming flow on propeller thrust.

As noted above, the logical next step is to create a HIL test bench. This will require implementing data exchange via a serial port (UART) between MATLAB and an Arduino board, which will emulate the flight controller or work with a real IMU.

A panel can be added to the interface for configuring the parameters of PID controllers for roll, pitch and yaw channels. This will allow not only to observe the drone's acceleration characteristics, but also to actively stabilize it around a given orientation by conducting virtual tests of the control systems. The use of quaternions and the 4th order Runge-Kutta method ensures the accuracy and stability of calculations. The experiments confirmed the adequacy of the model and demonstrated its sensitivity to changes in physical and mass characteristics. The developed tool is of considerable value for educational and research purposes and has high potential for further development in the direction of creating complex HIL test benches.

## References


1. Zabolotnyi, O.V., Nikulin, S.S., Siroklyn, V.P., Koshevoy, N.D.: Study of Quadcopter Flight Dynamics and Reactions to Controls and Disturbances Using Dedicated Test Bench. In: Lytvynov, O., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2024. ICTM 2024. Lecture Notes in Networks and Systems 1473, pp. 311–324, (2025).
2. Djizi, H., Zahzouh, Z., Lakehal, A.: Quadcopter Prototype Stability Analysis Using Matlab Simscape Library. The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University of Targoviste 22(2), pp. 38–43, (2022).
3. Altınörs, A., Kuzu, F.: Dynamic Analysis of a Quadcopter Using PID, Adaptive and LQR Control Methods. International Journal of Innovative Engineering Applications 5(2), pp. 65–74, (2021).
4. Wei, P., Lin, X., Kong, Z.: System identification of wind effects on multirotor aircraft. International Journal of Intelligent Robotics and Applications 6, pp. 104–118, (2022).
5. Alexandrov, V., Rezkov, I., Shatov, D.: Finite-frequency Identification of the Quadcopter Translation Dynamics. 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, Romania, pp. 471–476, (2020).
6. Sveier, A., Sjøberg, A.M., Egeland, O.: Applied Runge–Kutta–Munthe-Kaas Integration for the Quaternion Kinematics. Journal of Guidance, Control, and Dynamics 42(12), pp. 2747–2754, (2019).
7. Walters, S.J., Turner, R.J., Forbes, L.K.: A comparison of explicit Runge-Kutta methods. The ANZIAM Journal 64(3), pp. 227–249, (2022).
8. Ershkov, S.V., Leshchenko, D.: On a new type of solving procedure for Euler–Poisson equations (rigid body rotation over the fixed point). Acta Mechanica 230, pp. 871–883, (2019).
9. Velasco, O., Valente, J., Alhama Blanco, P. J., Abderrahim, M.: An Open Simulation Strategy for Rapid Control Design in Aerial and Maritime Drone Teams: A Comprehensive Tutorial. Drones 4(3), 37 (2020).
10. Baharuddin, A., Mohd Basri, M.A.: Trajectory Tracking of a Quadcopter UAV using PID Controller. ELEKTRIKA – Journal of Electrical Engineering 22(2), pp. 14–21, (2023).
11. Rubin, M.B., Weiss, H.: Numerical algorithm for quaternion integration based on three independent parameters with no need for renormalization. Acta Mechanica 234, pp. 2009–2020, (2023).
12. Abdi, A., Hojjati, G., Jackiewicz, Z., Podhaisky, H., Sharifi, M.: On the implementation of explicit two-step peer methods with Runge–Kutta stability. Applied Numerical Mathematics 186, pp. 213–227, (2023).
13. Seelen, L.J.H., Padding, J.T., Kuipers, J.A.M.: Improved quaternion-based integration scheme for rigid body motion. Acta Mechanica 227, pp. 3381–3389, (2016).
14. Terze, Z., Müller, A., Zlatar, D.: Singularity-free time integration of rotational quaternions using non-redundant ordinary differential equations. Multibody System Dynamics 38, pp. 201–225, (2016).

# A MODEL FOR SHORT-TERM FORECASTING OF DEMAND FOR MEDICAL EQUIPMENT DURING A CRISIS SPIKE

**Oliinyk A., Kyrychenko I.**
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This paper presents an ensemble approach to predict short-term demand for medical equipment during crisis conditions, combining ETS, ARIMA, and LSTM methods with adaptive weights. Experimental results on a simulated network demonstrate that the ensemble model provides the highest forecasting accuracy. Integrating the forecast with a proactive equipment reallocation algorithm significantly reduces workload imbalances compared to reactive approaches.

**Keywords**: Medical Equipment, Demand Forecasting, Crisis Management, Ensemble Model, Time Series, Proactive Reallocation.

**Introduction**. Effective management of medical equipment during crises remains a key factor in ensuring high-quality medical care. Previous studies by the authors [1, 2] have shown that existing algorithms for optimizing the distribution of medical equipment (genetic algorithms, particle swarm algorithms, greedy heuristics) operate primarily in a reactive mode—responding to workload imbalances between facilities only after they have occurred. However, the experience of the COVID-19 pandemic and other crises [3, 4, 5] has demonstrated that the workload on medical facilities can increase rapidly, within a few days, while reactive redistribution of equipment is delayed by 1–3 days. This leads to a critical shortage of resources in overburdened facilities. Consequently, the urgent task of developing a model for short-term demand forecasting of medical equipment to enable proactive resource reallocation becomes imperative [6, 7].

**The purpose of the work** is to develop a criteria and embedded tools for implementing an adaptive algorithm for real time measuring angular velocity, which quantization error will not exceed a predetermined normalized value.

**Problem Statement.** Consider a system of $N$ medical facilities forming the set $\mathcal{H} = \{h_1, h_2, \dots, h_N\}$, where $h_i$ is the $i$-th medical facility. Each facility $h_i$ at time $t$ is characterized by the patient flow $P_i(t)$, the number of equipment units $E_i(t)$, the number of staff $S_i(t)$, and the average severity of cases $C_i(t)$. The integral indicator of a facility's workload $L_i(t)$ is defined as the weighted sum of normalized factors (patient load, equipment and staff load, and case severity index), as described in detail in [2]. The unevenness of the workload across the system is assessed by the imbalance index $D(t)$, which represents the coefficient of variation of the indicators $L_i(t)$ across all facilities; when $D(t) = 0$, the system is perfectly balanced.

The forecasting problem boils down to constructing an estimate $\hat{P}_i(t+\tau)$ of the future patient flow based on observations $\{P_i(k)\}_{k=1}^{t}$ for the forecasting horizon $\tau \in \{1,2,3\}$ (in days). Based on the forecast $\hat{P}_i(t+\tau)$, the predicted load index $\hat{L}_i(t+\tau)$ and the predicted imbalance $\hat{D}(t+\tau)$ are calculated, which makes it possible to initiate the redistribution of equipment before a critical imbalance occurs.

**The scientific novelty** of this work lies not in the ensemble approach itself (backpropagation weighting is a well-known technique [7]), but in the integration of adaptive ensemble forecasting with a workload-estimation model for medical facilities and algorithms for equipment redistribution. Such integration enables a shift from reactive to proactive resource management in crisis conditions.

Forecasting methods. To solve the problem at hand, three basic methods were investigated, and an ensemble model was proposed.

1. ETS (Error, Trend, Seasonality) — a classical statistical method of exponential smoothing [4] that models three components of a time series (error, trend, and seasonality). It is noted for its computational simplicity and stability on stationary data.

2. ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) is an autoregressive integrated moving average model [5]. It is effective for trending series but requires stationarity after differentiation and may prove insufficiently flexible for sharp nonlinear changes.

3. LSTM (Long Short-Term Memory) — a recurrent neural network with long short-term memory [6]. It can capture complex nonlinear dependencies and sharp changes in dynamics

characteristic of crisis spikes, but requires a larger volume of training data and more computational resources.

Since none of the above methods is universally the best, an ensemble model is proposed that combines the predictions of three methods:

$$\hat{P}_i(t+\tau) = \alpha \cdot \hat{P}_i^{ETS}(t+\tau) + \beta \cdot \hat{P}_i^{ARIMA}(t+\tau) + \gamma \cdot \hat{P}_i^{LSTM}(t+\tau). \quad (1)$$

Where $\alpha + \beta + \gamma = 1, \alpha, \beta, \gamma > 0$ . The weight coefficients are determined adaptively based on the mean absolute percentage error (MAPE) of each method over a sliding validation window of length $W = 5$ days. The window size was chosen as a compromise between the speed of adaptation to regime changes and the stability of weight estimates: a smaller value ($W = 3$ ) led to excessive sensitivity of the weights to random fluctuations. In comparison, a larger value ($W = 7$ ) led to a delay in adaptation during the transition to the crisis phase (based on the results of previous experiments):

$$\alpha = \frac{1/(MAPE_{ETS} + \epsilon)}{1/(MAPE_{ETS} + \epsilon) + 1/(MAPE_{ARIMA} + \epsilon) + 1/(MAPE_{LSTM} + \epsilon)}. \quad (2)$$

Similarly, for $\beta$ and $\gamma$, where $\epsilon = 0.01$ is the regularization parameter prevents division by zero. This approach gives greater weight to the method with the smallest error on the latest observations, so the ensemble adapts to the regime change (transition from normal to crisis).

Forecasting accuracy is evaluated using MAPE (assuming$P_i(t) > 0$ ):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^{n} \left| \frac{P_i(t) - \hat{P}_i(t)}{P_i(t)} \right|. \quad (3)$$

**Experimental study.** To evaluate the proposed model, a synthetic network was created consisting of $N = 12$ medical facilities, whose parameters approximate the real characteristics of hospitals in a medium-sized city (capacity ranging from 80 to 350 patients, equipment ranging from 15 to 60 units). The modeling was performed in Python 3.11 using the statsmodels (ETS, ARIMA), PyTorch (LSTM), and NumPy libraries. Each experiment was run 30 times with different initial conditions.

The simulation was carried out over three different scenarios, each lasting 30 days. Scenario A models normal conditions with a steady patient flow and random fluctuations of ±10%. Scenario B represents a crisis surge, with workload increasing logistically from 80% to 150% across four facilities, peaking between days 7 and 12. Scenario C depicts the post-crisis phase, characterized by an exponential decline in workload and varying recovery rates. The accuracy was assessed using the rolling forecast method [12], in which the model is retrained on all available data from day 8 onward to generate a forecast for the following period. The window then shifts forward by one day, and this process repeats until the end of the period. This method ensures that test points include all phases, including the crisis's growth stage. The average training and forecast times per iteration were 0.05 seconds for ETS, 0.15 seconds for ARIMA, 1.8 seconds for LSTM, and 2.0 seconds for the ensemble.

The results of the forecast accuracy comparison are presented in Table 1.

Table 1

**Comparison of forecasting accuracy (MAPE, %), mean ± 95% CI, n = 30**

| Method | Scenario A, τ=1 | Scenario A, τ=3 | Scenario B, τ=1 | Scenario B, τ=3 | Scene C, τ=1 | Scene C, τ=3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ETS | 7.8 ± 0.9 | 12.4 ± 1.3 | 17.6 ± 1.8 | 28.3 ± 2.5 | 11.2 ± 1.1 | 18.7 ± 1.9 |
| ARIMA | 7.1 ± 0.8 | 11.5 ± 1.2 | 15.8 ± 1.6 | 25.1 ± 2.3 | 10.5 ± 1.0 | 17.2 ± 1.7 |
| LSTM | 6.3 ± 0.7 | 9.8 ± 1.1 | 12.1 ± 1.4 | 19.5 ± 2.0 | 8.7 ± 0.9 | 14.3 ± 1.5 |
| Ensemble | 5.6 ± 0.6 | 8.9 ± 1.0 | 10.4 ± 1.2 | 17.1 ± 1.8 | 7.8 ± 0.8 | 12.8 ± 1.3 |

As shown in Table 1, the ensemble model outperforms others in accuracy across all scenarios. Its greatest advantage is seen in crisis scenario B: at a horizon of τ=1, the ensemble's MAPE is 10.4%, compared to 12.1% for LSTM and 17.6% for ETS. This is due to the adaptive weights (Equation 2), which automatically increase the LSTM's role during surges when nonlinear dynamics are prevalent, while still benefiting from the stabilizing effects of statistical methods.

To assess the practical effectiveness of the forecast, the predicted load indices $\hat{L}_i(t+\tau)$ are integrated with a greedy equipment reallocation algorithm [1], which is the fastest among the studied heuristics and therefore crucial for rapid response in crisis conditions. In the proactive variant, the algorithm initiates reallocation based on the predicted imbalance $\hat{D}(t+\tau)$ instead of the current one $D(t)$. The results are presented in Table 2.

Table 2

**Average imbalance index *D* for reactive and proactive redistribution (mean ± 95% CI, n = 30)**

| Approach | Scenario A | Scenario B | Scenario C |
|---|---|---|---|
| Reactive (without prediction) | 0.19 ± 0.02 | 0.41 ± 0.03 | 0.30 ± 0.02 |
| Proactive, τ=1 day | 0.17 ± 0.02 | 0.34 ± 0.03 | 0.25 ± 0.02 |
| Proactive, τ=3 days | 0.16 ± 0.02 | 0.31 ± 0.03 | 0.23 ± 0.02 |

In normal mode (Scenario A), the effect is less pronounced (11–16%) due to minor load fluctuations, for which the reactive approach is sufficient.

The dynamics of the forecasted and actual load for one of the crisis facilities in Scenario B are shown in Fig. 1. The graph clearly shows that the ensemble model most accurately reproduces the shape of the crisis surge. At the same time, ETS systematically underestimates the peak load, and ARIMA demonstrates a delayed response to a sharp change in trend.

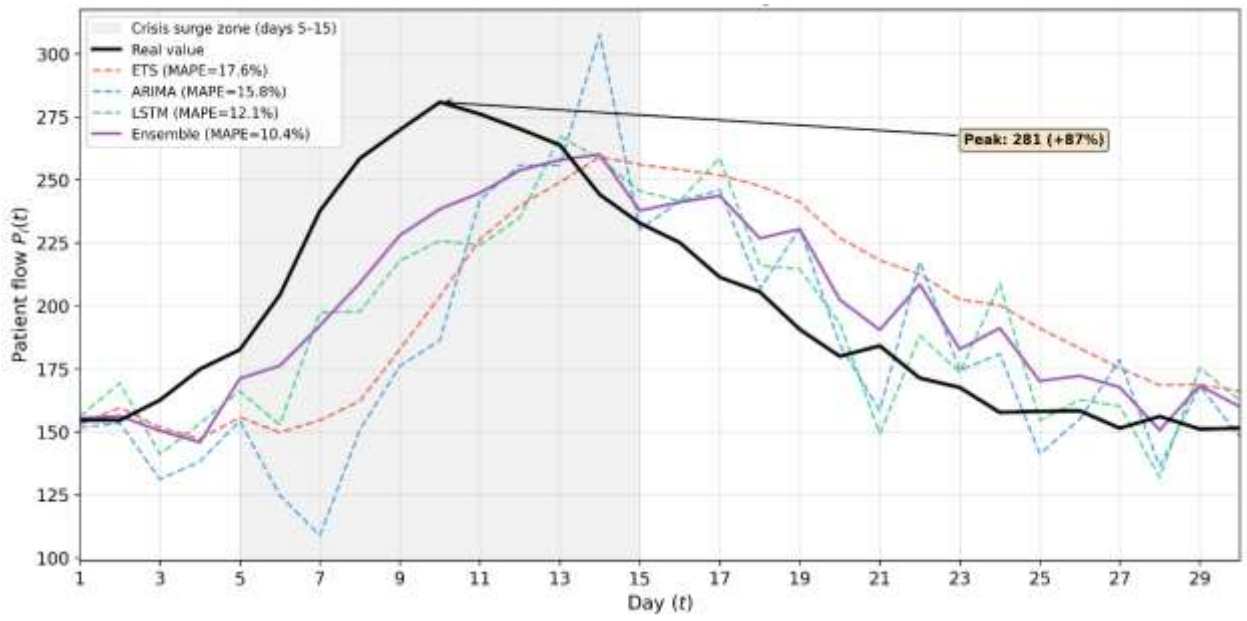



Fig. 1. Dynamics of actual and forecasted workload $P_i$(t) for a crisis facility (Scenario B, τ=1 day). Solid line — actual value; dashed lines — forecasts by ETS, ARIMA, LSTM, and the ensemble. The crisis surge zone (days 5–15) is highlighted in gray

**Conclusion.** This paper presents an ensemble approach to predict short-term demand for medical equipment, blending ETS, ARIMA, and LSTM methods with adaptive weights determined through a rolling validation process. An experimental study conducted on a simulated network of 12 medical facilities using rolling forecasting validated three key findings. First, the ensemble model shows the highest forecasting accuracy across all scenarios: in the crisis scenario, the ensemble's MAPE is 14% lower than LSTM's and 41% lower than ETS's over a 1-day horizon.

Second, LSTM most effectively models the nonlinear dynamics of a crisis surge, whereas ETS and ARIMA are more stable under normal conditions, which supports the use of the ensemble method. Third, integrating the forecast with a greedy equipment reallocation algorithm decreases the load imbalance index by 17–24% in the crisis scenario compared to the reactive approach and by 47–52% compared to static allocation.

At the same time, the study was conducted on synthetic data with a deterministic crisis-surge structure (a logistic function), which may lead to an overestimation of forecast accuracy, especially for LSTM. In real-world data, where the surge dynamics are stochastic, the results may differ. A separate limitation is the computational complexity of LSTM: the average training time per iteration was 1.8 seconds, which is 36 times longer than ETS and 12 times longer than ARIMA. When deploying the system in real time with a constant influx of new data for N facilities, this can pose a problem; possible strategies include incremental fine-tuning rather than full retraining and using pre-trained weights as initial weights [13, 14]. Further research could focus on validating models using retrospective healthcare data, developing adaptive real-time ensemble weight updates [15, 16], and combining these with more sophisticated dynamic reallocation algorithms.

## References


1. Kyrychenko I., Oliinyk A. Comparative Analysis of Heuristic Algorithms for Optimizing the Distribution of Medical Equipment in a Crisis. Radioelectronic and Computer Systems. 2025. No. 2. Pp. 45–58.
2. Kyrychenko I. V., Oliinyk A. E. Research on Models for Optimizing the Use of Medical Equipment in Crisis Conditions. Information Processing Systems. 2025. Issue 1. Pp 112–125.
3. Oliinyk A. Ye., Kyrychenko I. V. Analysis of Typical Crisis Situations and Their Impact on the Use of Medical Equipment. Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference. Kharkiv, 2025. Pp. 78–82.
4. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne: OTexts, 2021. 442 p. URL: https://otexts.com/fpp3/ (accessed: 15.01.2026).
5. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 712 p.
6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
7. Makridakis S., Spiliotis E., Assimakopoulos V. The M4 Competition: 100,000 time series and 61 forecasting methods. International Journal of Forecasting. 2020. Vol. 36, No. 1. P. 54–74. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.04.014.
8. Ranney M. L., Griffeth V., Jha A. K. Critical Supply Shortages — The Need for Ventilators and Personal Protective Equipment during the Covid-19 Pandemic. New England Journal of Medicine. 2020. Vol. 382, No. 18. P. e41. DOI: 10.1056/NEJMp2006141.
9. Emanuel E. J., Persad G., Upshur R. et al. Fair Allocation of Scarce Medical Resources in the Time of COVID-19. New England Journal of Medicine. 2020. Vol. 382, No. 21. P. 2049–2055. DOI: 10.1056/NEJMsb2005114.
10. Vespignani A., Tian H., Dye C. et al. Modelling COVID-19. Nature Reviews Physics. 2020. Vol. 2, No. 6. P. 279–281. DOI: 10.1038/s42254-020-0178-4.
11. Weissman G. E., Crane-Droesch A., Chivers C. et al. Locally Informed Simulation to Predict Hospital Capacity Needs During the COVID-19 Pandemic. Annals of Internal Medicine. 2020. Vol. 173, No. 1. P. 21–28. DOI: 10.7326/M20-1260.
12. Tashman L. J. Out-of-sample tests of forecasting accuracy: an analysis and review. International Journal of Forecasting. 2000. Vol. 16, No. 4. P. 437–450. DOI: 10.1016/S0169-2070(00)00065-0.
13. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. 800 p.
14. Zhuang F., Qi Z., Duan K. et al. A Comprehensive Survey on Transfer Learning. Proceedings of the IEEE. 2021. Vol. 109, No. 1. P. 43–76. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3004555.
15. Cerqueira V., Torgo L., Mozetič I. Evaluating time series forecasting models: an empirical study on performance estimation methods. Machine Learning. 2020. Vol. 109, No. 11. P. 1997–2028. DOI: 10.1007/s10994-020-05910-7.
16. Montero-Manso P., Athanasopoulos G., Hyndman R. J., Talagala T. S. FFORMA: Feature-based Forecast Model Averaging. International Journal of Forecasting. 2020. Vol. 36, No. 1. P. 86–92. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2019.02.011.

# INTEGRATED EFFECTIVENESS ASSESSMENT MODEL FOR GUIDED AERIAL VEHICLES WITH MICRO TURBOJET ENGINES

**Pantielieieva N., Laiske Y., Rashevskyi Y., Khutorna M., Goncharenko O., Stupka B.**
State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification
Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This study aims to develop a scientific and methodological framework for assessing the effectiveness of guided aerial vehicles (GAVs). The object of the study is the process of employment of GAVs equipped with micro turbojet engines (MTJEs). The subject of the study is the influence of the operational characteristics of GAVs with MTJEs on the integral effectiveness indicator of their employment. The study uses mathematical modeling, simulation methods (including Monte Carlo), multi-parameter optimization, and statistical analysis. The article presents an integrated mathematical model for assessing the effectiveness of using a GAV equipped with an MTJE. The model integrates flight dynamics, propulsion, atmospheric, control-system, and effectiveness-assessment submodels. The modeling results confirmed the possibility of increasing the flight range of the GAV, expanding the permissible range of altitude and speed of its use, while maintaining guidance accuracy, thereby improving the overall effectiveness of the GAV compared to the basic unguided configuration without an engine. The proposed integrated mathematical model enables optimization of GAV deployment in tactical aviation.

**Keywords:** guided aerial vehicle; micro turbojet engine; integrated mathematical model; effectiveness.

**Introduction.** The emergence of GAVs equipped with MTJEs has led to the importance of a scientific and practical problem of assessing their effectiveness, which requires solutions in both theoretical and practical dimensions. The integration of an MTJE into the GAV design has resulted in significant changes in their operational characteristics, particularly flight range, duration of exposure within the enemy counteraction zone, as well as engagement accuracy, which in turn transforms the evaluation paradigm of the effectiveness of such vehicles. Previous research on GAV effectiveness assessment focuses primarily on classical criteria and traditional evaluation models [1, 2, 3]. However, the integration of MTJE technology requires consideration of complex operational trade-offs not addressed in conventional approaches. Currently, increasing attention is being paid to the assessment of MTJE operational characteristics under various operating modes [4], including for the purpose of comparative analysis of different engine types and justification of their applicability as part of GAV systems. Therefore, it can be confidently stated that the existing scientific and methodological approaches do not fully account for the specific features of GAVs equipped with MTJEs, particularly the interrelationship between engine operating modes, flight trajectory parameters, and effectiveness indicators. This determines the need for further development of the scientific and methodological framework for evaluating the effectiveness of GAVs with MTJEs, aimed at improving their effectiveness and optimizing operating modes.

**Problem Statement.** The operational challenges associated with GAVs arise from their intended purpose and functional characteristics. First, it is necessary to optimize GAV operational modes to ensure maximum flight range using an MTJE while reducing release altitude and improving both mission effectiveness and carrier aircraft survivability. Second, an important task is to align MTJE operating parameters with GAV effectiveness indicators while accounting for the complex interaction of aerodynamic, energy-related, and stochastic factors that determine flight trajectory, engagement accuracy, and the probability of tactical mission accomplishment. Thus, the problem statement consists in developing an integrated model for the systematic evaluation of GAVs with comprehensive consideration of the influence of MTJE operational parameters, which will support informed decision-making regarding the optimal operational use of GAVs.

**The purpose of the study** is to develop an integrated model for the systematic assessment of the effectiveness of GAVs, considering the combined influence of MTJE parameters under employment conditions.

**Problem Solution.** The integrated model intended for the systematic assessment of the effectiveness of GAVs, with comprehensive consideration of the influence of MTJE parameters under employment conditions, has the following mathematical formalization:

$$M_{GAB\_STE} = \langle S, M_{PhM}, M_{Dyn}, M_{Eff}, A \rangle, \quad (1)$$

where $S$ is the GAV employment scenario; $M_{PhM}$ is the integrated physical model; $M_{Dyn}$ is the dynamic probabilistic model; $M_{Eff}$ is the effectiveness assessment model; and $A$ is the action model.

The structure of the developed integrated model and the information relationships among its components at the data level are presented in Fig. 1. This model incorporates various types of interconnections (parametric, operational mode-based, aggregative, and others). At the same time, the information links ensure the transfer of parameters from the input scenario data $S$ to the structural submodels of the integrated physical engine model, the generation of trajectory characteristics and their aggregation into effectiveness indicators, as well as the feedback influence of assessment results on control parameters during the optimization process.

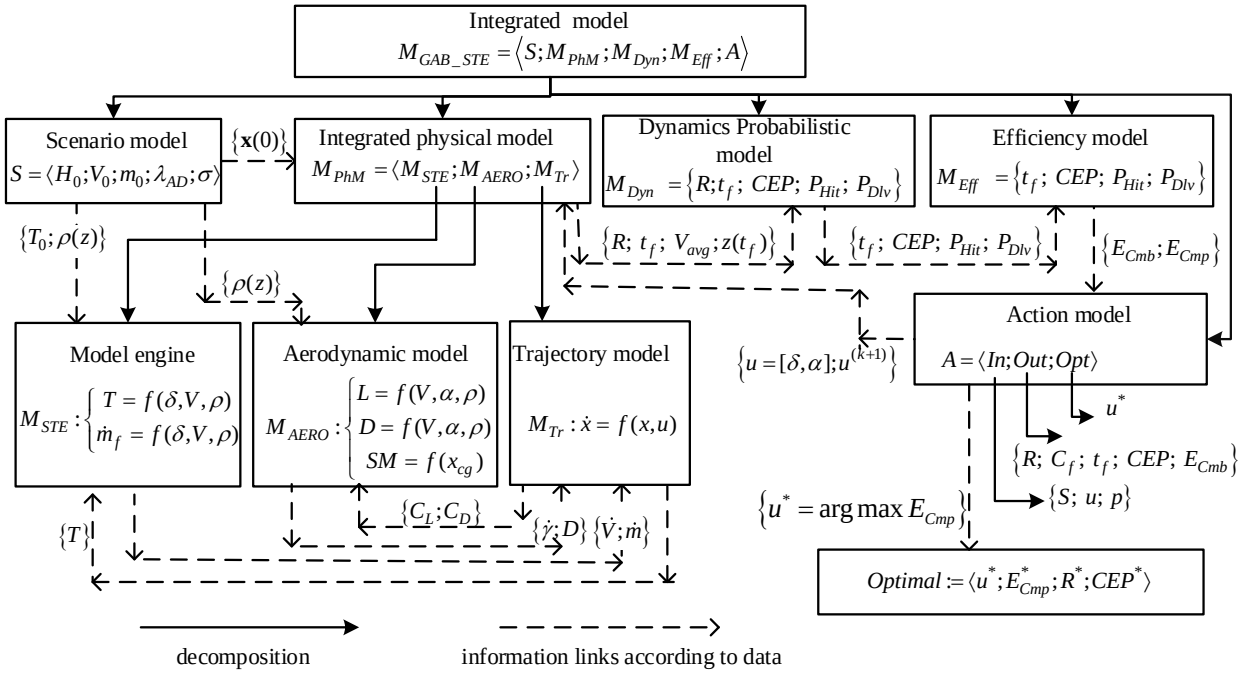



Fig. 1. Structural diagram of the integrated model for the systematic assessment of the effectiveness of GAV employment

The simulation result for each control parameter scenario $(u)$ is the comprehensive effectiveness indicator $E_{Cmp}$ , represented as the function:

$$E_{Cmp} = F(R(u);\ CEP(u);\ t_f(u); C_f(u);\ \eta(u); E_{Cmb}), \quad (2)$$

and the selection of the optimal control is determined by:

$$u^* = \underset{u \in U}{\operatorname{argmax}}\, E_{Cmp}\,(u), \quad (3)$$

where $R$ is the GAV employment range; $CEP$ is the GAV guidance accuracy indicator; $t_f$ is flight time; $C_f$ is engine fuel consumption per flight; $\eta$ is engine energy effectiveness; and $E_{Cmb}$ is the effectiveness of GAV employment.

Simulations of a virtual prototype of the GAV showed that an MTJE enhances flight range and thereby improves survivability, although this also increases flight time (Fig. 2). As release height $H$ rises, range gain $Kr$ drops approximately logarithmically (~20–25 times), from ≈120–150 ($H \approx 200$ m) to ≈5.5–6.5 ($H \approx 5000$ m). The accuracy gain $K\Delta$ follows a saturation trend, rising from ≈1.2–1.8 ($H \approx 200$ m) to ≈6.2–6.8 ($H \geq 3000$ m). The survivability gain $KSrv$ decreases logarithmically by 1.5–2 orders of magnitude. The $H \leq 1000$ m range forms an effective operating

zone with an optimal compromise: $Kr \approx 23.2 - 148.8$, $K\Delta \approx 1.53 - 3.94$, and $KSrv \approx (0.67 - 4.38) \times 10^{-5}$. Beyond this, further effectiveness gains are limited.

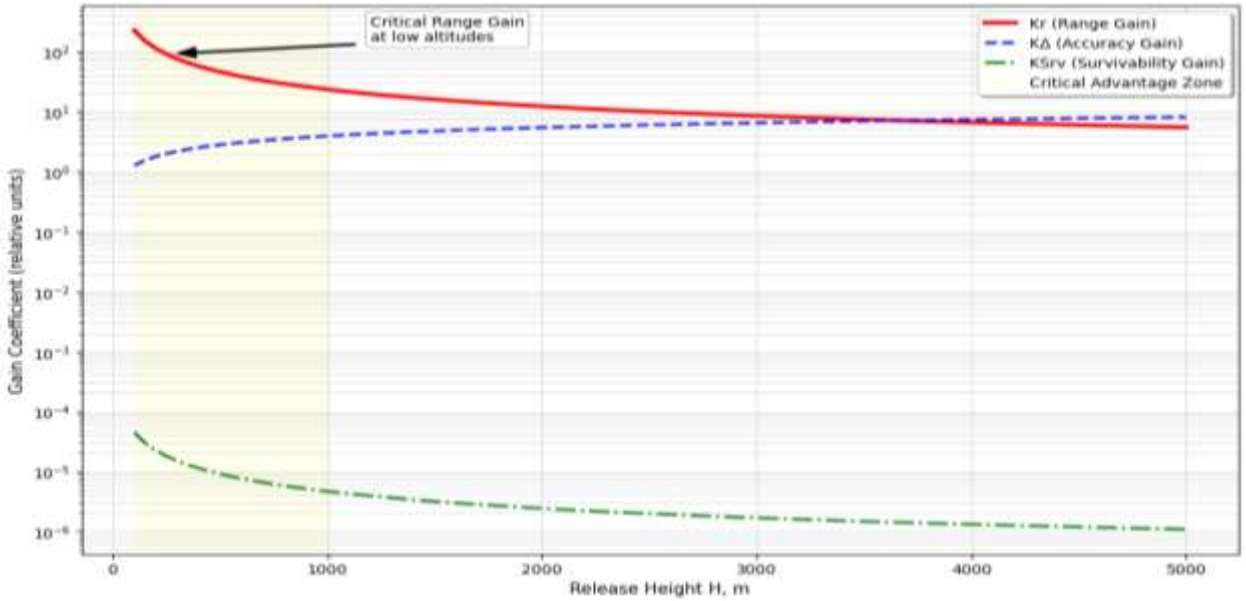



Fig. 2. Dependence of effectiveness gain coefficients on release height

Mathematical modeling and optimization of the application parameters of GAVs with MTJEs were carried out based on the criterion of maximizing the integral effectiveness indicator using Monte Carlo simulation, providing a statistically reliable probabilistic evaluation of system performance under uncertainty of input parameters. The results revealed a pronounced dependence on the operational range of GAV applications. As the operational range increases beyond 200 km, the effectiveness indicator increases by approximately 2.5–2.8 times. Flight duration also demonstrates a positive influence. The optimization analysis showed that the maximum value of the effectiveness indicator $E_{Cmp}$= 0.167 is achieved by a guided aerial vehicle with a micro turbojet engine at a flight range of 1200 km and a flight duration of 195 min, which defines the optimal control vector.

**Conclusion.** The proposed integrated effectiveness assessment model combines deterministic physical submodels with probabilistic evaluation of GAV operational outcomes, enabling its application in testing, evaluation, and optimization of tactical aviation mission planning.

## References


1. Wrage S. Prospects for precision air power. *Defense & Security Analysis*. 2003. Vol. 19(2). P. 101–109. https://doi.org/10.1080/1475179032000083334.
2. Ludvik F. Precise guided aircraft bombs. *Advances in Military Technology*. 2007. Vol. 2. P. 59-72. https://share.google/189HIiuWTR2LQPksB.
3. Bashynskyi K., Bashynskyi D., Kozyr A., Kholodnyi R. Development of methods for forming areas of allowed conditions for dropping guided aviation bombs of modular structure. *Scientific works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification*. 2022. Vol. 3(13). P. 17-24. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.13.2022.02.
4. Vouros A., Kyriazis A., Templalexis I., Papagiannakis R. Experimental Testing and Optimization-Based Performance Modeling of a Microjet Engine. *Energies.* 2025. Vol. 18. 4824. https://doi.org/10.3390/en18184824.

# PROBABILISTIC METHODS FOR EARLY ANOMALY DETECTION IN IoT SYSTEMS USING SHORT BINARY SEQUENCES

**Popereshnyak S.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine

**Abstract**. This paper presents a probabilistic method for early anomaly detection in IoT-based environmental monitoring systems using short binary sequence models. The proposed approach is designed for real-time scenarios with limited observation windows, where conventional machine learning methods demonstrate reduced effectiveness due to insufficient training data. The framework is based on exact combinatorial–probabilistic modelling of short patterns and provides interpretable results without requiring training procedures. Experimental results confirm the ability of the method to detect early-stage anomalies in environmental systems, enabling timely response under resource-constrained conditions.

**Keywords**: Short Binary Sequences; Anomaly Detection; IoT Systems; Environmental Monitoring; Probabilistic Modelling; Edge Computing

**Introduction**. Modern IoT systems play a key role in environmental monitoring, enabling continuous observation of parameters such as water quality, temperature, and chemical composition. However, in many practical applications, especially in distributed environments, data are obtained in short time intervals and often contain noise and uncertainty.

Traditional anomaly detection methods are typically based on machine learning techniques that require large datasets and often lack interpretability. In contrast, real-time monitoring systems frequently operate under data scarcity conditions, where only short observation windows are available. To address this limitation, probabilistic approaches that operate directly on observed data without training become particularly relevant. The use of short binary sequence analysis provides a compact representation of system states and enables the detection of structural changes in data streams.

**The purpose of this work** is to develop a probabilistic method for early anomaly detection in IoT monitoring systems based on short binary sequences under limited data conditions.

**Formulation of the problem**. In IoT-based environmental monitoring, data are collected in real time within short observation windows, limiting the applicability of conventional and machine learning methods. Environmental processes are dynamic and require early detection of structural changes under limited data conditions. Therefore, the problem is to develop an anomaly detection method that operates on short data sequences, ensuring efficiency, robustness, and interpretability without training data.

**Proposed Method.** To address the formulated problem, a probabilistic framework based on short binary sequence analysis is proposed. Continuous sensor data are transformed into binary form using predefined thresholds corresponding to acceptable system states.

The resulting sequence is segmented using a sliding window, allowing local analysis of temporal dynamics. Within each window, joint probabilities of short patterns (2- and 3-chains) are estimated to identify deviations from expected behaviour.

Unlike traditional approaches, the proposed method relies on exact probabilistic distributions, making it suitable for small sample sizes and eliminating the need for asymptotic approximations.

The integration of multiple probabilistic models enables the detection of both subtle deviations and more pronounced structural changes.

**Adaptive Analysis Framework.** The proposed approach consists of several processing stages. Sensor data are first converted into a binary representation, reducing complexity and enabling probabilistic analysis. The binary sequence is then segmented using a sliding window, and for each segment, probabilistic characteristics and deviation indicators are computed. These are aggregated into a risk indicator reflecting the current system state.

Based on this indicator, system states are classified as normal, warning, or critical. The method operates in real time and can be deployed at the edge level, enabling low-latency anomaly detection in resource-constrained IoT systems.

The full implementation of the proposed method is illustrated in Fig. 1 and consists of the following steps:

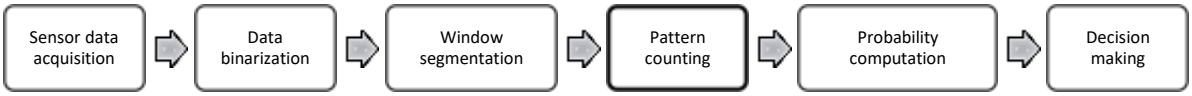



Fig. 1. Stepwise process of converting sensor signals into probabilistic decisions

An important feature of the framework is its ability to operate in real time. The computational simplicity of the probabilistic models allows deployment at the edge level, reducing latency and enabling rapid response to detected anomalies. This makes the approach particularly suitable for distributed IoT systems with limited computational resources.

**Analysis of Probabilistic Indicators.** The proposed method employs a set of probabilistic indicators that capture complementary aspects of system behaviour (Table 1).

Table 1

**Interpretation of probabilistic indicators**

| **Indicator** | **Description** | **Interpretation** |
|---|---|---|
| $\Delta 1$ | Deviation from independence | Early anomaly detection |
| $\Delta 2$ | Reinforcement of patterns | Structural dependency |
| Risk indicator | Combined metric | Overall system state |

The first indicator measures deviations from independence, allowing detection of early structural changes. The second indicator reflects the formation of local dependencies and clustered patterns. The third component is an integral risk indicator that aggregates information from individual measures and provides a smoothed representation of system dynamics.

The combined use of these indicators enables the identification of different system phases, including stable operation, transition, and partial recovery, improving anomaly detection reliability.

Table 2

**System states based on probabilistic indicators**

| **State** | **Indicator values** | **Description** | **Action** |
|---|---|---|---|
| INFO | $\Delta 1 \approx 0, \Delta 2 \approx 0$ | Stable system | No action |
| WATCH | $\Delta 1 < 0$ or $\Delta 2 > 0$ | Emerging anomaly | Monitoring |
| ALERT | $\Delta 1 << 0, \Delta 2 >> 0$ | Critical state | Immediate response |

**Experimental Results.** The proposed method was evaluated using environmental monitoring data from a freshwater ecosystem, including parameters such as dissolved oxygen and pH.

The results show that probabilistic indicators detect early deviations several observation windows before critical thresholds are reached, providing early warning signals. The method also demonstrates stable performance across different window sizes, confirming robustness under limited data conditions. Together, these indicators distinguish stable windows ($\Delta \approx 0$) from segments with structured dependencies and elevated risk. Their combined representation (Fig. 2) reveals key phases of system evolution, including stability, transition, and partial recovery.

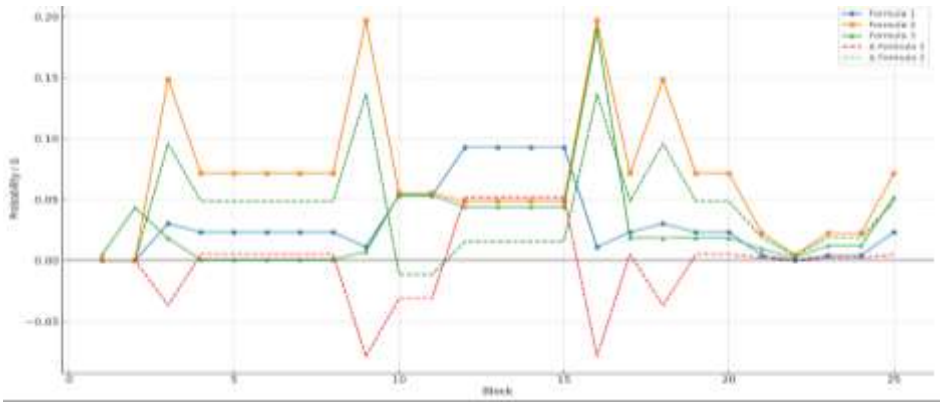


Fig. 2. Probability estimates and deviations ($\Delta 1$, $\Delta 2$) over sliding windows

As shown in Fig. 2, the initial phase is characterised by near-zero deviations, while the middle phase shows increasing Δ1 and Δ2 values, indicating growing dependencies. In the final phase, deviations decrease but do not fully return to baseline, reflecting residual instability.

**Discussion.** The proposed approach offers several advantages over traditional methods. It does not require training data, ensuring applicability in real-time scenarios with limited observations, and provides interpretable results.

Its computational simplicity enables deployment in resource-constrained environments, including edge devices, reducing latency between data acquisition and anomaly detection.

A limitation of the method is the loss of information due to binary representation; however, this is compensated by improved robustness and simplicity.

Overall, probabilistic methods based on short binary sequences represent a promising direction for real-time anomaly detection in data-scarce environments.

**Conclusion**. The proposed probabilistic framework provides an efficient and interpretable solution for anomaly detection in IoT monitoring systems under limited data conditions. The use of short binary sequences and exact probability models ensures stable performance and early detection of environmental anomalies.

Experimental results confirm the ability of the method to provide early warning signals and support timely intervention.

Future work will focus on extending the approach to multivariate data and integrating hybrid probabilistic and machine learning models.

## References


1. Zulkifli, C.Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A.H., Alamleh, A., Ahmaro, I.Y.Y., Sulaiman, S., Ibrahim, A.B., Zaidan, B.B., Ismail, A.R., Albahri, O.S., Albahri, A.S., Soon, C.F., Harun, N.H., Chiang, H.H.: IoT-based water monitoring systems: A systematic review. Water 14(22), 3621 (2022). https://doi.org/10.3390/w14223621
2. Jan, F., Min-Allah, N., Düştegör, D.: IoT-based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. Water 13(13), 1729 (2021). https://doi.org/10.3390/w13131729
3. Geetha, S., Gouthami, S.: Internet of things enabled real-time water quality monitoring system. Smart Water 2(1), 1 (2017). https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y
4. Pang, G., Shen, C., Cao, L., Van Den Hengel, A.: Deep learning for anomaly detection: A review. ACM Computing Surveys 54(2), Article 38 (2021). https://doi.org/10.1145/3439950
5. Kim, Y., Kim, H.K.: Anomaly detection using clustered deep one-class classification. In: 2020 15th Asia Joint Conference on Information Security (AsiaJCIS), pp. 151–157. IEEE, Taipei (2020). https://doi.org/10.1109/AsiaJCIS50894.2020.00034
6. Garcia Lopez, P., Montresor, A., Epema, D., Datta, A., Higashino, T., Iamnitchi, A., Barcellos, M., Felber, P., Riviere, E.: Edge-centric computing: Vision and challenges. SIGCOMM Computer Communication Review 45(5), 37–42 (2015). https://doi.org/10.1145/2831347.2831354
7. Peng, F.: Environment monitoring based on the integration of edge computing and multimodal sensors. Applied and Computational Engineering 117, 42–47 (2024). https://doi.org/10.54254/2755-2721/2024.18307
8. National Institute of Standards and Technology: A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications. NIST Special Publication 800-22 Revision 1a (2010). https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-22r1a
9. Masol, V., Popereshnyak, S.: Statistical analysis of local sections of bits sequences. Journal of Automation and Information Sciences 51(10), 31–45 (2019). https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v51.i10.30
10. Iglesias Vázquez, F., Hartl, A., Zseby, T., Zimek, A.: Anomaly detection in streaming data: A comparison and evaluation study. Expert Systems with Applications 233, 120994 (2023). https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120994

# MATHEMATICAL MODELING OF NON-GAUSSIAN RANDOM PROCESSES BASED ON MUTUALLY INVERSE NORMALIZING TRANSFORMATIONS

**Prykhodko S.**[1,2]
[1]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
[2]Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

**Abstract**. A method for constructing mathematical models of non-Gaussian random processes (NGRPs) in the form of nonlinear stochastic differential equations (SDEs) using mutually inverse normalizing transformations is considered. Examples of constructing nonlinear SDEs for some NGRPs are given: extreme sea waves, speech signals, ship roll motion in irregular waves, and stochastic carrier signals in a digital communication system based on the stochastic process shift keying. Computer simulations of the specified processes were provided using the constructed SDEs in the Scilab software. The comparison of the results of computer simulations with experimental data showed their satisfactory quality. In particular, the relative error for the standard deviation of the ordinates of the specified NGRPs did not exceed 5%.

**Keywords**: Mathematical Modeling, Non-Gaussian Random Process, Normalizing Transformation, Stochastic Differential Equation, Computer Simulation, Scilab.

**Introduction**. As is known, non-Gaussian random processes (NGRPs) are random processes whose distribution deviates from Gaussian (normal). They are often found in finance, information technology, and other fields, including digital communication, in particular, when the transmission of digital information over a channel is carried out by altering certain aspects of a stochastic carrier signal (stochastic process shift keying, SPSK [1]). There are two types of mathematical models for SPSK realization: autoregressive models [1] and stochastic differential equations (SDEs) [2]. By nature, SPSK realization using nonlinear SDEs increases noise immunity compared with SPSK realization by autoregressive models and other methods based on deterministic and chaotic carrier signals.

Mathematical modeling of NGRPs requires the construction of certain mathematical models, which remains a difficult task. Nonlinear SDEs are often used as mathematical models of NGRPs, primarily because these equations allow us to describe the physical features of these processes. In [3], a method for structural identification of nonlinear stochastic differential systems based on normalizing transformations was proposed for constructing nonlinear SDEs, the essence of which is as follows. Using the normalizing transformations, which are mutually inverse, the NGRPs are transformed into Gaussian random processes (GRPs). Next, using the method of shaping filters, linear SDEs for GRPs or normalized signals are obtained according to [3]. Then, using the inverse transformation, nonlinear SDEs are constructed.

**The goal of the work** is to consider the method for constructing mathematical models of NGRPs in the form of nonlinear SDEs using mutually inverse normalizing, to construct nonlinear SDEs of some NGRPs using the method proposed by the author, and simulate these NGRPs in the Scilab software.

**Formulation of the problem**. Suppose that the input data are realizations of components of a stationary NGRP, the distributions of the ordinates of which deviate from the Gaussian (normal). We need to build a mathematical model of the NGRP in the form of a nonlinear SDE using mutually inverse normalizing transformations.

**Solving the problem**. To construct a mathematical model of the NGRP in the form of a nonlinear SDE using mutually inverse normalizing transformations, we apply the method [3] for structural identification of nonlinear stochastic differential systems based on normalizing transformations.

We constructed four nonlinear SDEs for the following NGRPs: extreme sea waves, speech signals, ship roll motion in irregular waves, and stochastic carrier signals in a digital communication system based on the stochastic process shift keying. We used the Johnson transformation of the $S_U$ family, which is bijective, i.e., not only is it mutually inverse, but also allows us to obtain isomorphic sets during data transformation.

The constructed nonlinear SDEs not only allow taking into account the physics of the NGRPs being modeled, but also, in some cases, to explain certain physical phenomena. In particular, the constructed nonlinear 2nd-order SDE for the intense roll motion of a ship model in irregular waves can explain the phenomenon of a larger roll angle on the side that is located towards the irregular waves. This phenomenon was observed in experiments by various researchers and could not be explained by the existing roll motion equations.

The resulting mathematical model of sea waves in the form of a nonlinear 4th-order SDE allows us to take into account the two-peak form of the frequency spectrum of the ordinates of sea waves, including extreme ones. The specified SDE allows us to model the appearance of both extreme waves and waves coming from a storm from another sea area against the background of wind waves.

The constructed mathematical model of the speech signal in the form of a nonlinear 8th-order SDE allows us to take into account the four-peak shape of the frequency spectrum of the ordinate of the speech signal. This allows us to use the specified SDE as a mathematical filter model for speech signal recognition in the case of intense noise.

For the four nonlinear SDRs indicated by the Euler method, the corresponding difference equations were constructed, according to which the computer simulations of the specified NGRPs were performed in the Scilab software. The comparison of the results of these simulations with experimental data showed their satisfactory quality.

**Conclusion**. The considered method for mathematical modeling of NGRPs based on mutually inverse normalizing transformations allows obtaining nonlinear SDEs of various NGRPs, which makes it possible to take into account the physics of the processes being modeled, and in some cases, to explain certain physical phenomena. In the specified method, it is desirable to use bijective normalizing transformations, one of which is the Johnson transformation of the $S_U$ family, which allows modeling NGRPs with a kurtosis greater than 3. The use of bijective normalizing transformations leads to the absence (at the expense of theoretical) loss of information during data transformation. The comparison of the simulation results of some NGRPs with experimental data showed their satisfactory quality. In particular, the relative error for the standard deviation of the ordinates of the specified NGRPs did not exceed 5%. This, among other things, indicates the efficiency of the considered method.

In the future, it is planned to use the specified method to perform mathematical modeling of other NGRPs. It is also planned to compare our results with those that can be obtained using the so-called normalizing flows, which are also currently actively used for modeling stochastic processes by SDEs [4].

## References


1. Salberg, A.-B., Hanssen, A.: Secure digital communications by means of stochastic process shift keying. In Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Cat. No.CH37020), Volume 2, pp. 1523-1527. Pacific Grove, CA, USA, (1999). https://doi.org/10.1109/ACSSC.1999.832004.
2. Prykhodko, S. B.: Combined use of stochastic process shift keying and two-level quadrature amplitude modulation for digital information transmission in communication systems. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 90 (2), pp. 192-196, (2007). (in Ukrainian).
3. Prykhodko, S. B.: Structural identification of nonlinear stochastic differential systems on the basis of mathematical models of normalized signals. Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute, No.3, pp. 86–92, (2009). (in Ukrainian).
4. Bekri, N. E., Drumetz, L., Vermet, F.: Time changed normalizing flows for accurate SDE modeling. In Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 6395-6399. Seoul, the Republic of Korea, (2024). https://doi.org/10.1109/ICASSP48485.2024.10446131.

# DETERMINING THE SWITCHING AND LANDING TIME IN THE MOON SOFT LANDING PROBLEM

**Revina T., Tymoshchuk D., Duda D.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** After a short introduction to the landing problem on the Moon, we solve this problem using Pontryagin's Maximum Principle. According to it, the optimal control for such a problem is bang-bang control, i. e., the engine is either turned off or operates at maximum thrust. Thus, the trajectory is divided into two parts: a free-fall phase and an active braking phase. The main task of the research is to find the exact time of engine start-up. For this purpose, the final height is used as a smooth residual function. To find the engine start-up time, a sequential scanning algorithm with adaptive step division (bisection) has been developed. The result of the algorithm was tested on a model example.

**Keywords**: Numerical Methods for Initial Value Problems, Pontryagin's Maximum Principle, Optimal Bang-Bang Control, Moon Lander, Shooting Method.

**Introduction.** There is currently a huge interest in landing various probes on the lunar surface that would provide more information about the internal structure and composition of the Moon [1]. From a mathematical point of view, the soft landing problem is to minimize fuel consumption during a vertical soft landing of the spacecraft on the Moon. Let us introduce the following notations: *h(t)* is the height, *v(t)* is the vertical velocity and *m(t)* is the mass of the spacecraft, $k$ is the fuel consumption coefficient, $g = 1.622\frac{m^2}{sec}$ is acceleration of gravity on the Moon. The system of equations of motion (dynamical system) has the form [2]:

$$\begin{cases} \dot{h}(t) = v(t), \\ \dot{v}(t) = -g + \dfrac{u(t)}{m(t)}, \\ \dot{m}(t) = -ku(t). \end{cases}$$

The control influence *u(t)* denotes the engine thrust and is bounded as follows $0 \le u(t) \le u_{max}$. Initial conditions are $h(0) = h_0,\ v(0) = v_0, m(0) = m_0.$ Besides, at the time of landing, $\tau$ we have h($\tau$) = 0, v($\tau$) = 0. The last equality means that the landing is soft. The cost function is $\frac{1}{k}(m_0 - m(\tau))) \longrightarrow min.$

By using Pontryagin's Maximum Principle, we get that the control is bang-bang, thus the trajectory is divided into two parts: a free-fall phase $u(t) = 0,\ 0 \le t \le t_s$ and an active braking phase $u(t) = u_{max},\ t_s \le t \le \tau$ where $t_s$ is switching time [3, Ch. 1.6].

**The purpose of the work** is to develop an algorithm for determining the switching and landing time for specific initial parameters of the system. This will allow us to build a phase trajectory of the system.

**Formulation of the problem.** Analysis of the dynamic measurements allows us to state the following: the function of the final velocity versus the switching time has a sharp break, which makes it impossible to use classical gradient methods (Newton-Raphson) or the secant method [4, Par. 9.1]. Therefore, for the solution, it is proposed to use the final height as a smooth residual function. To find the engine start-up time, a sequential scanning algorithm with adaptive step division (bisection) has been developed.

**Solving the problem.** *In the falling phase*, the dynamical system has only initial (left boundary) conditions. The most rational way to find the trajectory of the spacecraft for this phase is to analytically solve the Cauchy problem. We get

$$\begin{cases} h_{free}(t) = h_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}, \\ v_{free}(t) = v_0 - gt, \\ m_{free}(t) = m_0. \end{cases} \quad (1)$$

*In the braking phase*, we have a boundary value problem

$$\begin{cases} \dot{h}(t) = v(t), \\ \dot{v}(t) = -g + \frac{u_{max}}{m(t)}, \\ \dot{m}(t) = -k\, u_{max}, \end{cases} \tag{2}$$

with the following conditions: on the left hand

$$h(t_s) = h_{free}(t_s), v(t_s) = v_{free}(t_s), m(t_s) = m_{free}(t_s)$$

and on the right hand: $h(\tau) = 0,\ v(\tau) = 0$.

An algorithm was written in Python to solve the problem. The essence of the method is to reduce the boundary value problem to a sequence of Cauchy problems by deriving the unknown shooting parameter. And also, we minimize the selected residual function at the right end of the interval [4, Par. 18]. In our case, this parameter is the engine start-up time $t_s$. And the residual function is chosen as $h(\tau, t_s)$.

*Features of the software implementation:*

Stop detection: Instead of a hard comparison $v\ (\tau, t_s\ ) \geq 0$, or $v(\tau, t_s) = 0$, the algorithm fixes the zero crossing ($v(\tau, t_s^i) \cdot v(\tau, t_s^{i-1}) \leq 0$).

Linear interpolation: In the last step, interpolation is used to accurately determine the height at the moment $v=0$, which completely eliminates the error of the discrete step.

To solve the system of differential equations (2), the classical vector Runge-Kutta method (RK4) was used. According to [5, Par. 5.1], this method has a high balance between computational robustness and accuracy (global error $O(\Delta t^4)$).

*Testing the algorithm on a model example.* In [6] such parameters of the system were considered: $h_0 = 100000\ m,\ v_0 = 100\frac{m}{sec},\ m_0 = 224\ kg\ (m_{fuel} = 204\ kg),\ u_{max} = 400\ N,$ $k = 2.883 \cdot 10e{-}3$.

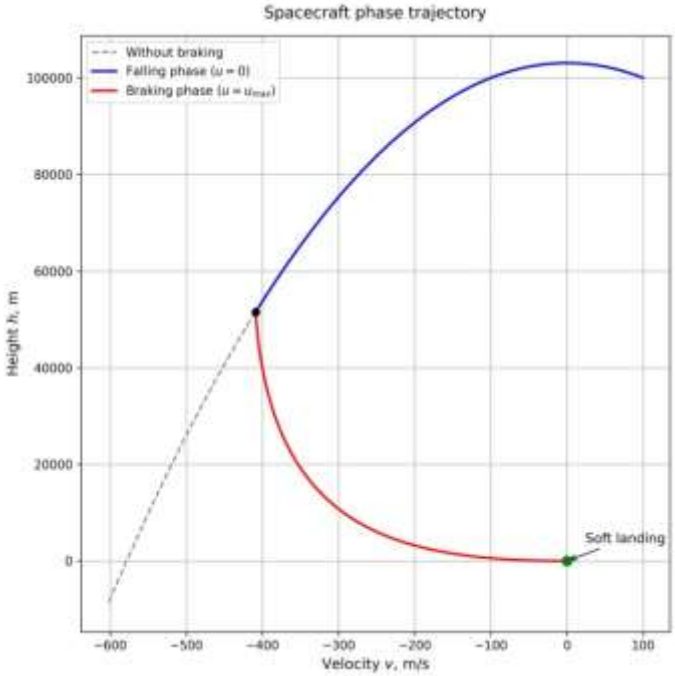



Fig. 1. Phase Trajectory

Table 1

**Comparison with the results of [6] (they are in brackets)**

| Parameter | $t_s$ switching time | $\tau$ time of landing |
|---|---|---|
| Time (s) | $t_s$ =313.75 (312.85) | $\tau$ = 481.61 (481.84) |
| Height (m) | $h_s$ = 51540.28 (51904.47) | $h_\tau = -0.0008$ |
| Velocity $\frac{m}{sec}$ | $v_s = -408.91\ (-407.45)$ | $v_\tau = 0.01$ |
| Mass (kg) | $m_s = 224.0$ | $m_\tau = 31.58$ (32,47) |

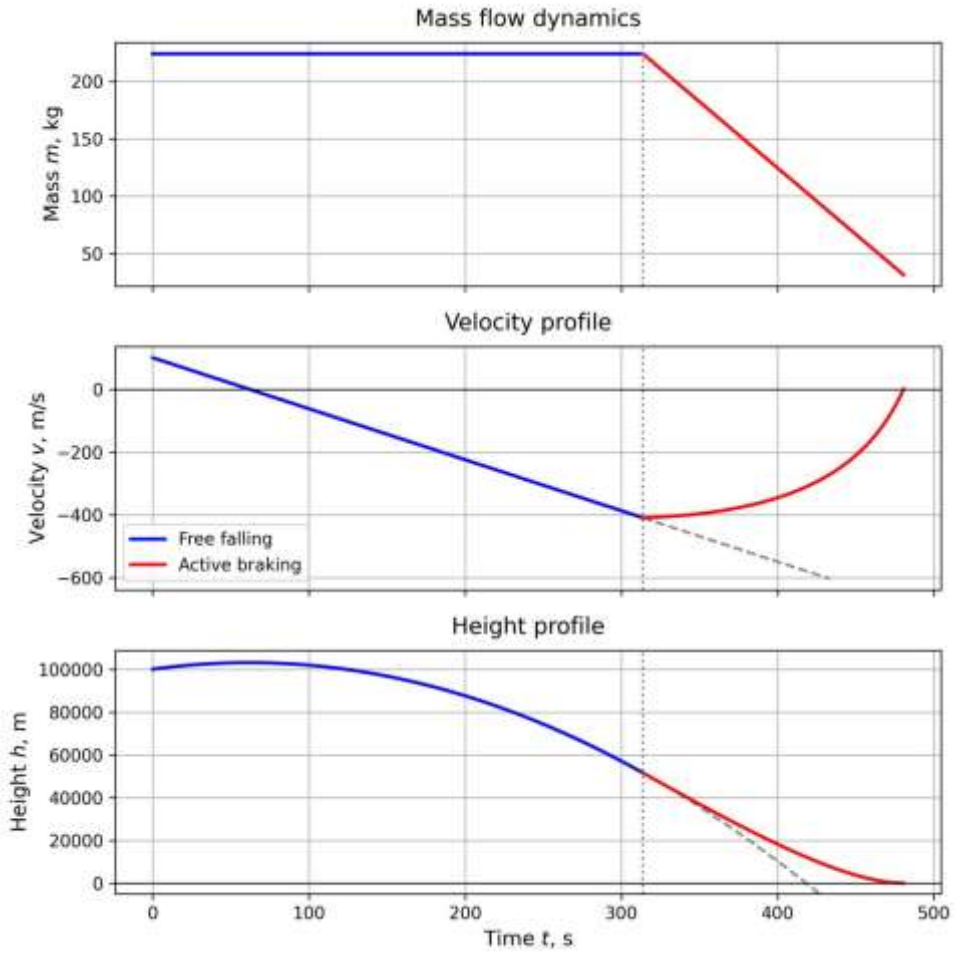



Fig. 2. Mass, Velocity, Height

In addition, two more examples were solved, namely the landing of a massive vehicle from rest and an example with complex kinematics (upward trajectory).

**Conclusion.** The problem of a soft landing on the Moon was solved analytically by Pontryagin's Maximum Principle and then numerically. For this, the Shooting method for solving the boundary value problem has been successfully implemented, and an algorithm for finding the switching time (modified bisection) was created. The calculation error at each step was reduced to $O(\Delta t^4)$. The result of the algorithm has a small error compared to what was calculated in the model example [6].

## References


1. Sakai S., Kushiki K., Sawai S., Fukuda S., Miyazawa Y., Ishida T., Saito H. Moon landing results of SLIM: A smart lander for investigating the Moon. *Acta Astronautica*, *235*, pp. 47-54, (2025). https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576525003297
2. Gazzola F., Marchini E.M. The moon lander optimal control problem revisited. *Mathematics in Engineering* 3(5), pp. 1-14 (2021): https://re.public.polimi.it/handle/11311/1148129.3
3. Pontryagin L. S. Selected works. Vol. 4 Mathematical theory of optimal processes. Taylor&Francis. (2018).
4. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 1256 p.
5. Burden R. L., Faires J. D. Numerical Analysis. 9th ed. Boston: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2011. 888 p.
6. Ocampo L. P. Solving The Optimization Control Problem For Lunar Soft Landing Using Minimization Technique: *Master's thesis.* Arlington: The University of Texas at Arlington, 2013. 43 p. https://mavmatrix.uta.edu/math_theses/13.

# INDUCTION HEATING MODELING OF ROTOR WHEELS IN THE EMWORKS

**Romanov S.[1], Kupriyanov O.[2], Dichev D.[3], Deryabkina E.[4]**
[1] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
[2] Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine
[3] Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria
[4] State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This paper presents a comprehensive study of the induction heating process of a feed pump impeller at an industrial frequency of 50 Hz, which was performed using finite element modeling in EMWorks. An original inductor design featuring a magnetic flux concentrators is discussed. A comparative analysis of numerical modeling results with data from a full-scale experiment recorded with a thermal imager showed good agreement.

**Keywords**: Interference Fit Joints, Induction Heating, Finite Element Modeling, EMWorks, Feed Pump Impellor.

**Introduction**. For cylindrical interference fits, thermal assembly is one of the most effective methods. Thermal extension allows free fitting of mating surfaces, and the resulting joint strength is 2 to 2.5 times higher than after press-fit assembly [1]. Induction heaters operating at industrial frequency are easy to maintain and energy-efficient.

Therefore, mathematical modeling of induction heating is of significant interest. It allows comparison of several alternative designs for an induction heater before manufacture, enabling selection of the best design. One of the leading solutions in this field is the EMWorks for SolidWorks software package, which includes an induction heating calculation module.

**The work goal** is to simulate the heating process of a feed pump impeller in EMWorks, compare the results with experimental data, and develop recommendations for using EMWorks to simulate induction heating.

**Problem statement**. Designing an induction heater is a complex engineering challenge, as it must generate and focus an alternating magnetic field to heat the workpiece. In addition to one or more copper coils that generate the magnetic field, such an induction heater contains magnetic flux concentrators that focus the magnetic field onto the desired surfaces of the workpiece [2]. Although methods exist for calculating the magnetic system, they yield discrepancies with experimental results, sometimes quite significant ones [3]. In the event of an error, redesigning a manufactured but inefficiently operating induction heater entails significant labor and material costs.

**Main part**.

To simulate the process, a 3D assembly was developed in SolidWorks, comprising [4]:

- An impeller with a high hub (steel GX20Cr14).
- Two induction coils of different diameters, positioned along the height of the impeller. The upper coil has 52 turns, and the lower coil has 60 turns.
- An H-shaped magnetic flux concentrators consisting of 4 radially symmetric branches made of 0.5 mm thick electrical steel plates.

In the simulation of the heating process, the initial temperature of the parts was 27°C, and the parts' surfaces and the induction heater components cooled naturally. Since the heating temperature did not exceed 300°C, a mixed boundary condition was used, combining convection and radiation into a single equivalent coefficient $a$ = 25 W/m²·K. The thermal conductivity of the part material was taken as $\lambda$ = 50 W/m·K, the specific heat capacity as $Cp$ = 500 J/kg·K, and the density as $\rho$ = 7800 kg/m³. Given the industrial frequency of 50 Hz, the skin depth $\delta$ is approximately 6–8 mm, which was accounted for when constructing the finite element mesh.

During the Transient Magnetic analysis, it was established that the majority of the energy is absorbed by the inner surface of the hub. Analysis of the results shows uniform heating of the mounting hole. By the end of the 5th minute of heating (300 s), the temperature in the contact zone reaches the target values to ensure the installation clearance.

Thanks to the use of an S-shaped magnetic circuit, the magnetic flux is primarily confined within the massive part of the hub [5]. The use of two inductor coils ensures a uniform distribution of isopoles along the height of the hub, eliminating axial temperature gradients.

Fig. 1 shows the simulation results. A radial temperature gradient is observed, with heat penetrating deep into the metal. In a layer approximately 10–15 mm thick from the surface, the temperature drops from 271°C to 204°C. Heat transfer into the metal occurs due to thermal conductivity. At the same time, the pump impeller blades remain within a safe temperature range, not exceeding 115–137°C.

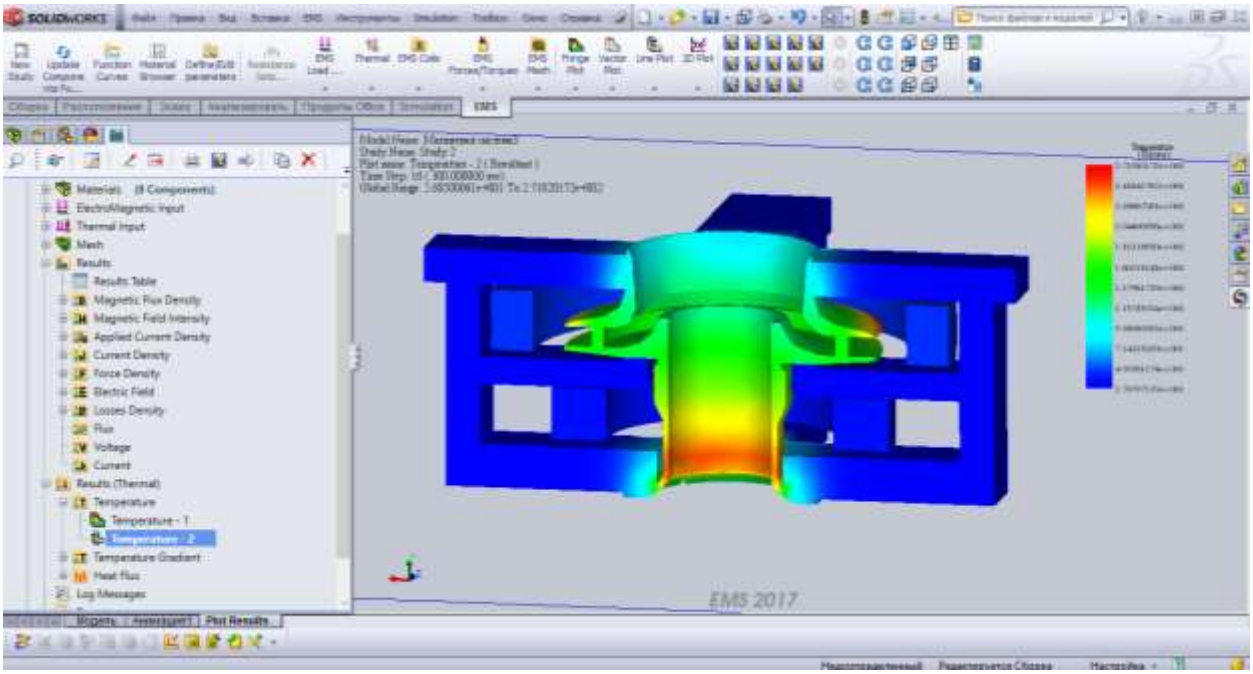



Fig. 1. Axial cross-section of the induction heater and the impeller during simulation

The simulation results were compared with the results of the full-scale experiment. Heating was performed in an induction heater with electrical and geometric parameters matched those of the model. The total heating duration was 300 s. The coils were connected to the power source sequentially to prevent high load on the power supply network and to reduce the cross-sectional area of the winding and power supply conductors. The current in the upper coil did not exceed 250 A, and in the lower coil, 170 A. The temperature of the part during and after heating was recorded using a Fluke thermal imager. The thermograms of the part immediately after heating are shown in Fig. 2.

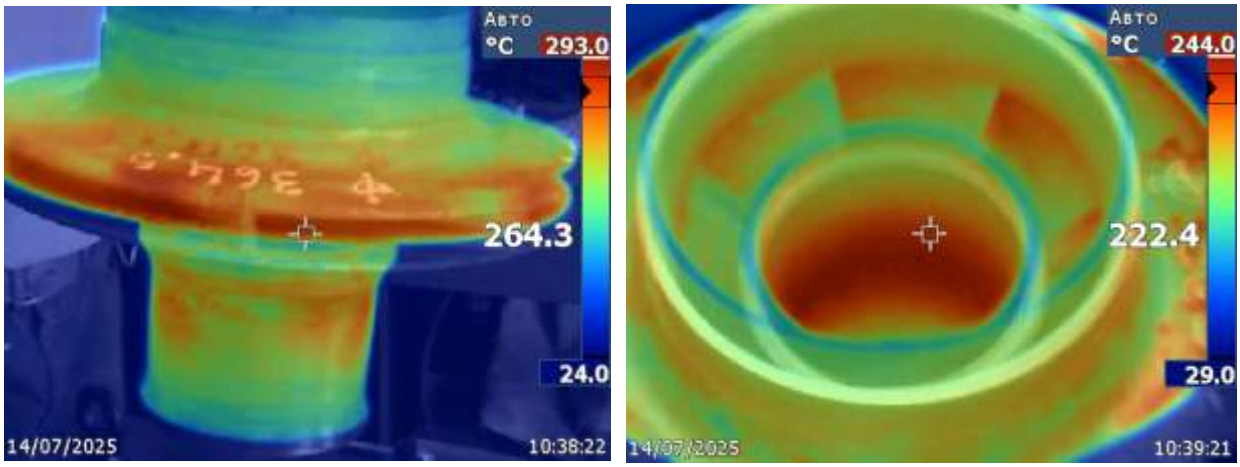



Fig. 2. Surface temperature measurement results after heating

**Conclusions**. The 7.5% difference in maximum temperatures at the end of the heating process between the experiment and the simulation indicates that the inductor's actual efficiency is slightly higher than the calculated value. A likely cause is the nonlinear dependence of the relative magnetic permeability of GX20Cr14 steel on field strength and temperature, which is defined as a constant in the standard EMWorks material library. As the part's temperature rises, remagnetization losses increase, contributing to additional temperature rise.

## References


1. Kupriyanov O. (2019) Ansys Simulation of the Joint Strength with the Interference Fit in the Presence of the Shape Geometry Error. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. pp. 72-78. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_8
2. Dimitrov, V., Tarpov, I. (2024) Measurement of the magnetic field of an induction heater for locomotive wheelsets. In: Iliev, T., Stoyanov, I., Mihaylov, G., Kogias, P. and Fantidis, J. (eds.) *International Conference on Electronics, Engineering Physics and Earth Science* (EEPES 2024). vol. 551, 03006. E3S Web of Conferences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455103006
3. Xiaoming, Z., Yu, B., Guobin, C., Jun, L., Jie, L., Kaiqiang, F., Chen, L. Wanjun, W. (2018) Influence of size parameters and magnetic field intensity upon the amplification characteristics of magnetic flux concentrators. *AIP Advances* 8, 125222. https://doi.org/10.1063/1.5066271
4. Romanov, S., Kupriyanov, O., Dichev, D., Hrinchenko, H., Lomanov, K. (2026). Application of Induction Heating for Disassembling Feed Pump Rotors. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14926-8_42
5. Kupriyanov O., Romanov S. (2020) Simulation of Induction Heating for Railway Wheel Set Elements During Assembly and Disassembly. 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing - The Innovation Exchange (DSMIE); *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Pp. 159–168. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_16

# SMART GRID INTERACTION MODEL ON AXELROD ITERATED PRISONER'S DILEMMA TOURNAMENT FRAMEWORK FOR INERTIAL SELECTION OF SUSTAINABLY EFFICIENT STRATEGIES

**Romanuke V.V.**
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Ukraine

**Abstract.** A simplified smart grid interaction model is presented based on agents that operate in a state-dependent Prisoner's Dilemma environment, periodically updating their strategies via virtual Axelrod tournaments under inertia, with price-mediated feedback linking individual behavior and system dynamics. The model is tuned by 12 parameters, a defection rate function, an inertia set, and a pair of integers to ensure the statistical stability of the tournament results. The inertia set introduces a time lag in adaptation, stabilizing the dynamics and preventing excessive sensitivity to short-term fluctuations. The main benefits are deeper and tighter decentralization, lower long-term energy costs, more stable and sustainable profits.

**Keywords:** smart grid interaction, Axelrod tournament, inertia, defection rate, grid operators.

**Introduction.** Modern smart grid systems are characterized by repeated and decentralized decision-making of energy prosumers and consumers whose collective behavior directly affects system stability, pricing, and efficiency [1]. In such environments, individual consumption choices are not isolated but interconnected through complex feedback mechanisms such as dynamic pricing and congestion-dependent costs [2]. This naturally leads to a multi-agent setting where system-level outcomes emerge from strategic interactions among users. The agents (users) have two choices (pure strategies or, for further reference, moves): it is to either comply with grid operation recommendations (shift load, reduce peak usage, or, in short, cooperate) or defy them (consume at peak, ignore load balancing signals, consume when convenient, or, in short, defect) [3, 4].

**Motivation.** A suitable framework for studying such two-choice interactions is provided by evolutionary game theory and dilemma games [5, 6]. This is the Axelrod Iterated Prisoner's Dilemma tournament (AIPDT) framework [7], which has become a broad open-source project maintained by a community of researchers in evolutionary game theory [3, 4, 5]. Classical strategy sets (herein, the strategy is a rule of how and when the cooperation or compliance and defection or defiance moves are made) introduced in Axelrod-style tournaments, such as TitForTat or WinStayLoseShift, provide useful baseline models of adaptive behavior [8, 9]. However, smart grid environments introduce additional complexity into the structure through endogenous pricing and congestion effects, requiring strategies that explicitly account for system state and payoff feedback.

**Goal and tasks.** Issuing from the smart grid state development complexity, the goal is to suggest a simplified smart grid interaction model that would allow players or users (consumers, prosumers, grid operators) to determine their efficient strategies through the process of interactions. To meet the goal, the baseline dilemma game (BDG) is to be formalized first. Then, a rule for computing the price and updating the state-dependent payoff matrix (SDPM) will be stated, followed by an AIPDT formalization. Finally, the realistic parameters of the BDG and AIPDT are to be selected, and examples of how the AIPDT-framework-based model is applied will be given.

**BDG and AIPDT.** Let there be $N$ users, each of which has a binary action set per time step $t$, i. e. $a_i(t) \in \{C, D\}\ \forall\, i = \overline{1, N}$ $(t = 1, 2, 3, ...)$, where $C$ and $D$ denote cooperation and defection, respectively. The BDG is initially defined by a set of four positive values $G_0 = \{r_0, s_0, q_0, u_0\}$, where $r_0$ is the user's payoff when both cooperate, $s_0$ is the user's payoff when the user cooperates and the opponent defects, $q_0$ is the user's payoff when the user defects and the opponent cooperates, $u_0$ is the user's payoff when both defect. Set $G_0$ is such that $s_0 < u_0 < r_0 < q_0$ [7, 8].

Let $f(t)$ be a fraction of defectors at time $t$:

$$f(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \gamma[a_i(t) = D] \text{ by}$$

$$\gamma[a_i(t) = D] = 1 \text{ if } a_i(t) = D \text{ and } \gamma[a_i(t) = D] = 0 \text{ if } a_i(t) = C. \quad (1)$$

Let $P_0$ be the starting price, and the price at time $t$ is determined by fraction (1) via $\varphi(f(t))$:

$$P(t) = P_0 + \varphi(f(t)) + \sigma\xi \text{ by } \sigma > 0 \text{ and } \xi \in \mathrm{N}_{\mathrm{gen}}(0, 1), \quad (2)$$

where $N_{gen}(0,\ 1)$ is a generator of random values ξ drawn from the normal distribution with zero mean and unit variance. A few plausible versions of function $\varphi(f(t))$ are:

$$\varphi\big(f(t)\big) = \alpha(f(t) - f_0) \text{ by } f_0 \in (0; 1) \text{ and } \alpha > 0,$$

$$\varphi\big(f(t)\big) = \alpha \max\{f(t) - f_0,\ 0\},$$

$$\varphi\big(f(t)\big) = 0.5\alpha(f(t) + f(t-1) - 2f_0),\ \varphi(f(t)) = \alpha(f(t))^2,$$

$$\varphi(f(t)) = \alpha f(t)(1.05 - f(t))^{-1},\ \ldots,$$

where it is presumed that the price generally raises up due to defections, but a small amount of defectors may not raise the price (this is done by a threshold value $f_0$). As the agents make their moves, the SDPM is updated with a set $G(t)$ linked to set $G_0$ as follows:

$$G(t) = \{r(t),\ s(t),\ q(t),\ u(t)\} \text{ by}$$

$$r(t) = r_0 - \beta(P(t) - P_0),\ s(t) = s_0 - \beta(P(t) - P_0) - \eta f(t),$$

$$q(t) = q_0 - \beta(P(t) - P_0) + \delta(1 - f(t)),\ u(t) = u_0 - \beta(P(t) - P_0) - \eta f(t), \qquad (3)$$

where the description and explanation of parameters β, η, δ and α, $f_0$ are given in Table 1.

Table 1

**Parameter interpretation for SDPM (ranges are exemplified for mildly influenced grids)**

| Para-meter | Meaning in the model with (1) – (3) | Economic (behavioral) interpretation | Typical range (practical) | Effect when increased |
|---|---|---|---|---|
| α | Price responsiveness to congestion | How strongly system price reacts once congestion threshold is exceeded | 0.02...1.5 | Sharper or more explosive price growth under defection |
| $f_0$ | Congestion activation point | Tolerance level of system before penalties start | 0.05...0.25 | Higher value implies more tolerant system, delayed penalties |
| β | Price sensitivity of payoffs | How strongly agents "feel" price changes (cost pass-through) | 0.1...0.3 | Stronger penalty from congestion leads to defection becomes less attractive |
| η | Direct congestion penalty | How much crowding (defector) presence directly reduces utility (externality) | 0.01...2 | Increases pressure against both cooperation and defection in congested states |
| δ | Temptation reinforcement from cooperation scarcity | "Scarcity reward": defection becomes more attractive when cooperation is high | 0.01...2.5 | Strengthens incentive to defect in cooperative environments |

The AIPDT has two core parameters essential for statistical stability and reliability. These parameters are the number of turns $T$ and the number of repetitions $R$. Integers $T$ and $R$ control statistical evaluation of strategy behavior, while the smart-grid dynamics define the external time evolution of the system state. Literally, $T$ is the number of rounds within one match between two strategies, and $R$ is the number of independent matches (Monte Carlo runs). Thus, $T$ controls the depth of interaction and $R$ controls statistical averaging, where typically $T = 100$, $R = 5$. Upon completion of the AIPDT, the candidate strategies are ranked according to their average scores, and the strategy with the highest average score is selected. However, the selection is attributed with an inertia parameter $\tau_i$ of agent $i$. The inertia parameter controls how frequently an agent updates its strategy. Instead of continuously recomputing the best-performing strategy after each system state change, the agent revises its strategy only at discrete time intervals [10]. This reflects bounded rationality and adjustment costs, preventing unrealistically frequent switching (not all agents update at the same time). So, if the last strategy update of agent $i$ happened at time step $t_*$, then at time step $t$ agent $i$ updates its strategy only if $t - t_* > \tau_i$; otherwise, the agent keeps its current strategy.

**Practical assessment.** In practice, price $P_0$ must be standardized, so $P_0 = 1$. The BDG values in set $G_0$ are standardized as well, and thus, the SDPM update parameters in Table 1 are adjusted more effectively. An example of running the AIPDT-framework-based model for a smart grid of 50 agents is given in Fig. 1 by the defection rate presented in Fig. 2 and the price dynamics in Fig. 3.

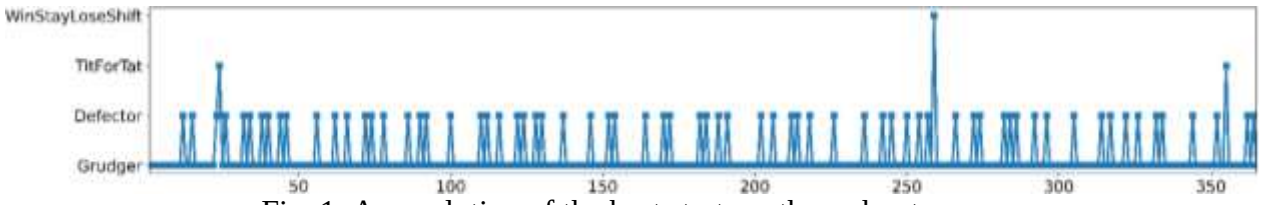



Fig. 1. An evolution of the best strategy throughout a year
by $P_0 = 1$, $\sigma = 0.05$, $\alpha = 0.1$, $f_0 = 0.15$, $\beta = 0.2$, $\eta = 0.25$, $\delta = 0.01$,
$r_0 = 0.11$, $s_0 = 0.08$, $q_0 = 0.12$, $u_0 = 0.09$, $T = 100$, $R = 5$, $\tau_i \in \{\overline{1,\ 10}\}$

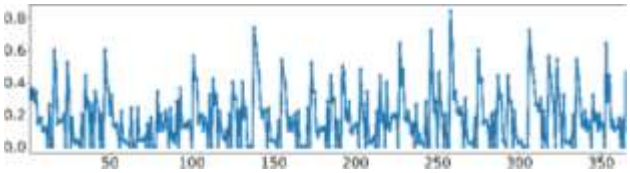



Fig. 2. The defection rate

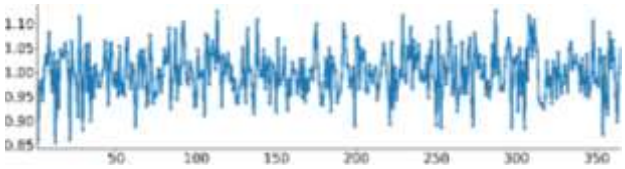



Fig. 3. The standardized price dynamics

**Conclusion.** The core structure of the presented AIPDT-framework-based model is of four successively linked components: environment (smart grid) with its dynamic price, game (SDPM), learning and selection mechanism via the AIPDT, and agent behavior by strategy execution with delayed update via inertia. The process iterates, coupling individual behavior with aggregate system dynamics. The main benefit for consumers consists in lower long-term energy costs through indirect coordination without explicit communication. The main benefit for prosumers is more stable and sustainable profit through adaptive strategies that respond to system-wide conditions. For grid operators, it is indirect control of grid stability and congestion through pricing design, reducing the need for centralized intervention. The AIPDT framework can be further developed by hybridizing the existing strategies (e. g., GrudgerDefector, TitForTatAlternator, CooperatorCycler, etc.).

## References

1. Rashid M. H. (2026). *Handbook of Power Electronics in Smart Grids and Intelligent Energy*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2021-0-02619-5
2. Huang H. *et al.* (2026). Bilevel optimization in smart grid operations: A review of real-time electricity pricing strategies and future directions. *Electric Power Systems Research*, Vol. 251, Article no. 112253. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112253
3. Zhou M. *et al.* (2025). Analysis and control of demand response in smart grids: An evolutionary game method. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 488, Article no. 129130. https://doi.org/10.1016/j.amc.2024.129130
4. Romanuke V. V. (2025). Compliance-and-defiance dilemma game best strategy for three and four agents. *Statistics, Optimization and Information Computing*, Vol. 14, No. 5, pp. 415–433. https://doi.org/10.19139/soic-2310-5070-2370
5. Cheng L. *et al.* (2025). Leveraging evolutionary game theory for cleaner production: Strategic insights for sustainable energy markets, electric vehicles, and carbon trading. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 512, Article no. 145682. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145682
6. Romanuke V. V. (2025). Best strategy in multi-agent symmetric dilemma game with a fixed fine for total defiance. *Journal of Mathematics and Applications*, Vol. 48, pp. 73–89. https://doi.org/10.7862/rf.2025.4
7. https://github.com/Axelrod-Python/Axelrod
8. Noordman C. R. and Vreeswijk G. A. W. (2019). Evolving novelty strategies for the Iterated Prisoner's Dilemma in deceptive tournaments. *Theoretical Computer Science*, Vol. 785, pp. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.tcs.2018.10.026
9. Hilbe C., Traulsen A., and Sigmund K. (2015). Partners or rivals? Strategies for the iterated prisoner's dilemma. *Games and Economic Behavior*, Vol. 92, pp. 41–52. https://doi.org/10.1016/j.geb.2015.05.005
10. Romanuke V. V. (2025). Optimal timing strategies in blockchain block proposals by one-bullet silent duels with one-third progression. *Information and Telecommunication Sciences*, Vol. 16, No. 1, pp. 30–42. https://doi.org/10.20535/2411-2976.12025.30-42

# MODEL-BASED MODIFICATION OF FORMAL-SPECIFICATION ATOMICITY FOR RESOURCE-AWARE MODEL CHECKING

**Shkarupylo V.[1,2], Artemchuk V.[1]**
[1]G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Formal specifications are increasingly used as design artifacts for safety-critical software. However, more fine-grained specifications tend to improve traceability to architectural models while exponentially increasing state-space growth during model checking. The paper presents a model-based framework for modifying the atomicity level of the TLA+ formal specifications without changing the number of state variables. Introduced framework stratifies formal specification into event, action, and behavior levels and introduces a developer-defined control factor that determines which behavior-level paths should be traversed through during the model checking. Framework is inspired by resilient energy-infrastructure design, where structurally variable systems require verifiable architectural representations. A case study grounded on the use of mathematically rigorous modular TLA+ formalism of the Temporal Logic of Actions (TLA), along with time-tested TLC (TLA Checker) model checker, shows that manipulation with the elements of the upper-level stratum makes it possible to overcome the available random-access memory volume as the limiting factor. It fosters the predictable reduction of model checking related computational and spatial expenses. The result is a practical instrument for adapting formal specifications to available computational and spatial resources while preserving the model-based interpretation of system architecture.

**Keywords**: Formal Specification, Model Checking, Atomicity, TLA+, TLC, Resilient Energy Systems.

**Introduction**. Modern safety-critical software is embedded in large socio-technical infrastructures, including transport, aerospace, energy and communication systems. For Ukraine, the repeated kinetic and cyber-attacks against energy infrastructure have made resilience not only an engineering objective, but also a national security requirement [1]. Resilience-oriented solutions for the energy sector increasingly rely on architectural variability, simulation and formal analysis of system behaviors [2].

In this context, an architecture can be approached as a graph-like combination of system components and corresponding connections. For structurally variable power systems, this interpretation is of significant relevance because the operator may need to reconfigure subsystems and related connections in order to preserve core functions under destructive impacts [3]. In terms of delivering the resilience in a comprehensive manner, named ability is expected to be considered starting from the initial stages of the software development process. The current paper focuses on the design stage of the latter, by synthesizing, formal checking (through the model checking) and analyzing related formal design artifacts, i.e., formal specifications, in an automated manner.

Temporal Logic of Actions (TLA) and related TLA+ formalism provide mathematically rigorous and modular means for specifying state-based behaviors and verifying them using the time-tested TLC (TLA Checker) model checker [4]. At the same time, the practical outcome of model checking is limited by the state-space explosion effect. The atomicity level of formal specification is therefore a critical design parameter: fine-grained specifications improve adequacy and traceability, whereas coarse-grained specifications reduce verification costs.

**Work goal**. The goal is to adapt formal specifications to the limitations of available computational and spatial resources by varying their atomicity level at the upper hierarchical plane. Introduced framework delivers preservation of the number of state variables and general architectural interpretation of formal specifications, while excluding excessive behaviors (sequences of states of the transition systems) from coverage during the model checking. Framework delivers a resource-aware mechanism for adapting TLA+ specifications of safety-critical and resilient infrastructure systems to the limitations of available computational and spatial resources.

**Problem statement**. The model checking task is interpreted as formal checking whether a temporal formula holds for every behavior defined in TLA+ specification. The number of transition system's paths depends on the number of state variables and on the architectural plane of specification: concurrent constructs increase the unwanted exponential state space growth effect drastically. Previous experimental results grounded on the use of time-tested TLC model checker have demonstrated that concurrency-oriented specifications can become infeasible in terms of exhaustive checking of the resulting coupled temporal formula with respect to each state of the transition system [5].

The research problem is to reduce computational and spatial expenses related with the TLC model checking without losing the model-based interpretation of the initial design artifacts, e.g., block diagrams, UML (Unified Modeling Language) activity diagrams. Straightforward and extensive increase of hardware resources does not provide an acceptable solution because of the exponential nature of the transition system's state space growth. Thus, the specification itself has to be modified in a controlled and transparent manner, by varying its atomicity level and preserving the number of state variables.

**Main part**. The introduced framework stratifies formal TLA+ specifications into three hierarchical planes. The bottom one contains atomic events that describe changes, or non-changes, of state-variable values. The interim plane groups these events into the formalized representations of TLA actions. The upper plane combines the actions into behavior-level constructs that define the paths traversed by the TLC. This stratification makes it possible to manipulate specifications at the level where state-space growth originates, while keeping the lower-level event semantics explicit.

The proposed framework can be considered as a complementary solution to the related work delivering stepwise refinement, decomposition, recomposition and multi-grained formal specifications [6]. Its specific contribution is the explicit treatment of atomicity as a controllable design-artifact property.

Atomicity modification is provided through the developer-defined control factor. In practical terms, only the selected behavior-level paths are checked, while the remaining paths are omitted from the TLC model checking. The factor is defined according to the limitations of the available computing platform and the developer's previous verification experience. In this way, the framework transforms a finer-grained specification into a coarser-grained verification artifact, delivering so using an explicit and reproducible rule.

The case study has been grounded on the TLA+ specifications with a gradually increasing number of state variables and with an interleaving interpretation of concurrent behavior. With respect to the initial, finer-grained, specification, $1.93536 \cdot 10^6$ behaviors have been obtained. Stepwise increase of the buffer size of the Java Virtual Machine has not resulted in the finalization of the model checking process, though. Thus, random access memory volume has become a limiting factor.

After applying the proposed model-based framework, with a focus on the upper, i.e., behavioral, hierarchical plane, the TLC model checking process has been completed successfully. Correctness of TLA+ specification has been formally proved: no deadlocks have been discovered, no memory limitations have been faced.

With a fixed step increase of control factor from $10^2$ to $5 \cdot 10^2$, proportional decrease of computational expenses relative estimates has been faced, up to 4 times. With respect to related spatial expenses, similar proportional decrease of the number of generated states of the transition system has also taken place. This tendency provides the background to make an assumption regarding the transparency and predictability of specifications' atomicity level amendment.

The proposed model-based framework can be used as a practical instrument for estimating and controlling TLC model checking related computational and spatial expenses, thus making it possible to overcome the limitations of available computing platform.

**Conclusions**. A model-based framework for modifying the atomicity level of the TLA+ formal specifications has been presented. Framework relies on the stratification of specification

elements into events, actions and behavior-level constructs. By amending the upper hierarchical plane with an explicit control factor, framework usage reduces the number of paths that have to be traversed through during the TLC model checking process. This allows adaptation of the latter to available computational resources.

Obtained case-study results have proven that the proposed model-based framework makes it possible to overcome the limitations of the available computing platform. Further research is focused on formalizing the relation between the control factor, the number of generated states of the transition system and the confidence level of verification results, as well as on applying the framework to realistic models of structurally variable and resilient power systems.

**Acknowledgements**. The research was conducted within the framework of project No. 2025.07/0204, "Parallel methods and algorithms for solving mixed-integer linear programming problems in the planning of structurally flexible and resilient power systems development in Ukraine", funded by the National Research Foundation of Ukraine.

## References

1. Nikolaieva, I., Zwijnenburg, W.: Risks and impacts from attacks on energy infrastructure in Ukraine, PAX report, December 2022. https://paxforpeace.nl/wp-content/uploads/sites/2/import/2023-01/PAX_Ukraine_energy_infrastructure_FIN.pdf.
2. Shkarupylo, V., Chemerys, O., Artemchuk, V., Alsayaydeh, J., Kudermetov, R., Polska, O.: Comprehensive stratified approach to energy resilience solutions taxonomy: a Ukraine scenario. In Proceedings of the 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, Athens, Greece, October 11-13, 2024. https://doi.org/10.1109/DESSERT65323.2024.11122234.
3. Saukh, S.: The concept of building a structurally variable power system, in: Are Low-Carbon Futures Decentralised? Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, pp. 61-75, (2025). https://doi.org/10.4337/9781035355198.00011.
4. Lamport, L.: Specifying systems: The TLA+ language and tools for hardware and software engineers. Addison-Wesley, Boston, (2002).
5. Shkarupylo, V. V., Tomičić, I., Kasian, K. M., Alsayaydeh, J. A. J.: An approach to increase the effectiveness of TLC verification with respect to the concurrent structure of TLA+ specification. International Journal of Software Engineering and Computer Systems, 4(1), pp. 48-60, (2018). doi:10.15282/ijsecs.4.1.2018.4.0037.
6. Ouyang, L., Sun, X., Tang, R., Huang, Y., Jivrajani, M., Ma, X., Xu, T.: Multi-grained specifications for distributed system model checking and verification. Proceedings of the Twentieth European Conference on Computer Systems, EuroSys '25, ACM, New York, pp. 379-395, (2025). doi:10.1145/3689031.3696069.

# MATHEMATICAL MODELLING AND OPTIMAL SYNTHESIS OF ROBUST CONTROL SYSTEMS FOR MOVING OBJECTS

**Sushchenko O., Yakubovskyi N.**
State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The article presents a generalized method for optimal synthesis of control systems for moving objects based on information and computer technologies. An analysis of methods for optimal synthesis of motion control systems, which are most effective during design and operation under uncertainty conditions, is performed. The features of the implementation of robust synthesis methods based on the MATLAB computing platform are characterized. The possibilities of information technologies for creating information support for the processes of optimal synthesis and mathematical modelling of control systems for moving objects based on typical mathematical models of inertial meters and weight transfer functions are given. The results of using the proposed method are presented on the example of a robust motion control system for a platform with equipment.

**Keywords**: Information Support, MATLAB Computing Platform, Optimal Synthesis, Robust Control, Mathematical Modelling, Control System of Moving Object.

**Introduction**. The design and operation of complex dynamic control systems for moving objects (aircraft, marine vessels, ground robots, as well as stabilized platforms with equipment) are carried out under conditions of uncertainty caused by inaccuracies in the mathematical description and unstructured uncertainty at the design stage and intense stochastic disturbances (aerodynamic wind, sea waves, uneven road, and terrain). The efficient solution of this problem can be achieved using the robust approach to the synthesis of control systems.

**The purpose of the work** The purpose of the work is to improve the efficiency and the operability of motion control systems for a wide class of objects under conditions of uncertainty. To achieve this purpose, a generalized method for the synthesis of robust control systems is proposed.

**Formulation of the problem**. The problem lies in the necessity to improve and accelerate the synthesis of control systems for moving objects of various types. To this end, it is proposed to develop a generalized robust synthesis method that leverages information support and mathematical modelling on the MATLAB computing platform.

**Solving the problem**. The solution to the proposed problem lies in the close relationship between information support and computer modelling based on the MATLAB software. In general, robust control is proposed, as this approach is effective for design and operation under uncertainty. The choice of the automated synthesis procedure crucially depends on the type and characteristics of the synthesized system. The first important procedure is to determine the type of optimal robust synthesis, which is selected depending on the purpose of the system (control of a platform or moving object) and the nature of uncertainty. Table 1 presents the MATLAB Toolboxes used in the synthesis of a robust control system for moving objects.

Table 1

**MATLAB Toolboxes for the synthesis of robust motion control systems**

| Method | Design Phase | Toolbox |
|---|---|---|
| $H_2/H_{inf}$ approach | Parametrical optimization | Control SystemToolbox |
| $H_{inf}$ synthesis | Robust structural synthesis | Robust ControlToolbox |
| LMI synthesis | Optimal structural synthesis | LMI Control Toolbox |
| μ synthesis | Robust structural synthesis for systems with strongly changed parameters | μ synthesis Toolbox |
| All methods | Checking synthesis results | Simulink |

Common methods of robust synthesis include $H_2/H_{inf}$ optimization (mixed robust parametric optimization), LMI optimization, $H_{inf}$ synthesis (robust structural synthesis), and μ synthesis [1]. Moreover, the last two methods are the most effective in terms of solving uncertainty problems. For example, in the case of known control laws, it is advisable to use $H_2/H_{inf}$ optimization. The synthesis of aircraft and heavy stabilized platform control systems using the $H_{inf}$ synthesis method. In the case

of synthesizing a robust control system for an unmanned aerial vehicle, it is desirable to use simpler methods based on LMI optimization.

The key point in both carrying out the optimal synthesis procedure and verifying its results is modelling [2, 3]. This process requires the use of various types of models, which are characterized in Table 2.

Table 2

**Mathematical models in synthesis procedures**

| Type of a Model | Toolbox | Synthesis Phase |
|---|---|---|
| Mathematical models of units in differential equations | Control System Toolbox | The definition of the system's structure |
| Mathematical models of the system in differential equations | Control System Toolbox | The previous analysis |
| State space models | Robust Control, LMI synthesis, μ synthesis | Robust structural synthesis |
| Disturbances models | Robust Control, LMI synthesis, μ synthesis | Optimal stochastic synthesis |
| The system's model, taking into account non-linearities and random disturbances | Simulink | Checking of the synthesis results |

Modern information technologies allow creating a bank of mathematical models, which allows significantly speeding up the laborious synthesis procedure. Of course, it is impossible to create a bank of control system models for all cases, but it is advisable to create typical models of separate components, for example, inertial measuring devices that are used on all moving objects. The structure of such information support is presented in Table 3.

Table 3

**Structure of mathematical models for the measuring components of a control system**

| Inertial Measuring Instrument | Type of Moving Object |
|---|---|
| Laser gyroscope | Aircraft |
| Coriolis vibratory gyroscope | Stabilized platform |
| Electro-mechanical gyroscope | Stabilized platform |
| Dynamically tuned gyroscope | Precision gimballed inertial navigation system |
| MEMS gyroscope | Unmanned aerial vehicle, moving robotic platform |

It is convenient to consider the proposed method for a concrete application, such as robust synthesis of a stabilized platform with equipment assigned for operation on a ground-moving object [2]. The synthesis results are shown in Figs 1, 2.

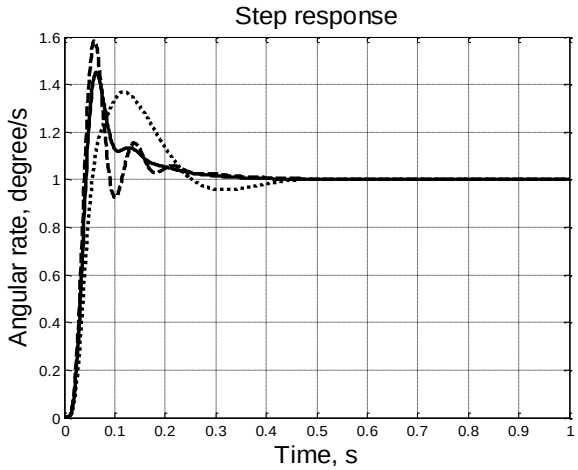



Fig. 1. The transient process on the angular rate for the changed inertia moment of the platform with the equipment

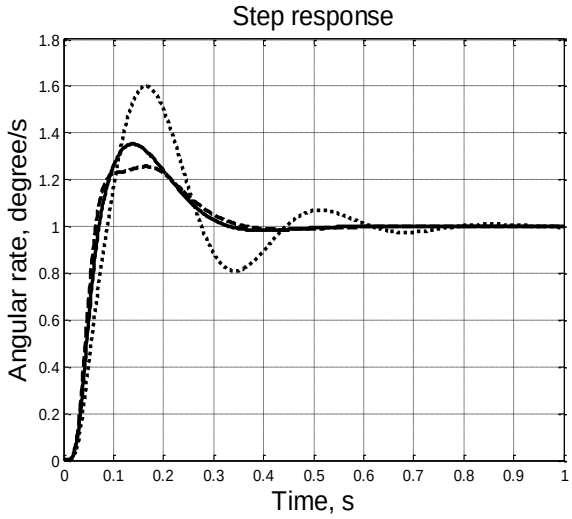



Fig. 2. The transient process on the angular rate for the changed coefficient of rigidity between the shafts of the platform with the equipment and actuator

Thus, the stabilized platforms with different instrumentation are widespread in the problems of moving objects operation [4]. The efficiency of the proposed generalized method is considered on the example of a robust system assigned for control of a platform with observation equipment assigned for operation at a ground-moving vehicle.

The considered stabilized platforms are operated in difficult conditions of significant parametric changes (up to 50% for the inertia moment and rigidity). The results given in Figs 1, 2 show the good convergence for such strongly changed parameters. It should mention that traditional methods, for example, LQR synthesis, do not ensure the system's stability for such significant parametric changes.

**Conclusion**. A generalized method for automated optimal synthesis and modelling of complex dynamic control systems for moving objects of a wide class is proposed. The advantages of the proposed method include integration with modern information and computer technologies, automation of the synthesis procedure, consideration of design and operation uncertainty, ease of implementation for wide-class systems, and ensuring the requirements for control accuracy in complex operating conditions accompanied by the action of intense stochastic disturbances. The disadvantages include high computational costs, the complexity of determining weight functions, and the need to perform the procedure in an interactive mode with the participation of a highly qualified specialist in control systems.

## References

1. Tsiu, Chia-Chi.: Robust Control System Design: Advanced State Space Techniques, CRC Press, Boca Raton, 320 p., (2022).
2. Sushchenko, O., Bezkorovainyi, Y., Salyuk, O., Yehorov, S.: Mathematical Description of System for Stabilization of Aviation Equipment in Problems of Synthesis and Simulation. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development ACASD 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 992, pp. 73–85. Springer, Cham, (2024). doi:10.1007/978-3-031-60196-5_7.
3. Kuznetsov, B.I., Nikitina, T.B., Bovdui, I.V., Voloshko, O.V., Kolomiets, V., Kobylianskyi, B.B.: The method of Multi Objective Synthesis of Stochastic Robust Control by Multimass Electromechanical Systems under Non-Gausian Random External Disturbances. Electrical Engineering & Electromechanics, 5, p. 21-30, (2022). https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.04
4. Li, B., Xie, X., Liao, Y., Fan, D.: Research on High-Precision Dynamic Modeling and Performance Evaluation of Inertially Stabilized Platforms. Applied Sciences, 14(14), p. 6074, (2024). https://doi.org/10.3390/app14146074

# A HYBRID MODEL FOR SIGNAL-BASED DEGRADATION ANALYSIS IN EDGE INTELLIGENCE SYSTEMS

**Tkachenko O., Shevchenko A.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The represented approach, based on analysis of signals simulated within the framework of a mathematical model of a physical process, allowed us to substantiate a hybrid approach to assessing degradation, which combines a characteristic description of the signal and a compact regression model. The paper proposes an approach to assessing the level of vibration signal degradation that combines physically interpreted synthetic signal modeling, window analysis, compact feature space construction, and regression estimation. Unlike approaches that directly work with the raw signal or use complex nonlinear models, the proposed scheme is focused on computationally efficient implementation and is suitable for further adaptation to edge and IoT systems.

**Keywords**: Edge Intelligence, IoT Systems, Signals Analysis, Spectral Descriptors, Regression Models, Mathematical Modeling.

**Introduction**. In the tasks of monitoring the technical condition of complex systems, signals coming from the physical environment are usually formed under the influence of several heterogeneous factors. They simultaneously reflect the normal dynamics of the object, possible appearance of degradation processes, as well as random internal and external disturbances. Current research and reviews emphasize the prospects of applying predictive maintenance models for effective detection of anomalies in signals [1,2]. Also examines the possibilities of combining artificial intelligence and peripheral computing for fault detection, diagnostics and forecasting of the condition of industrial machines [3]. The combination of different architectural layers for implementing machine learning is being actively explored [4], with a focus on lightweight edge models [5] capable of detecting events in real time, reducing data transfer to the cloud, and minimizing latency. A distinctive feature of this study is the use of informative spectral descriptors for accurate assessment of signal degradation by a compact regression model.

**The purpose of the work** is to develop a hybrid model for analysis of degradation signals able to be deployed on Edge Intelligence systems, which combines physically motivated signal modeling, formation of an informative feature space, and a compact regression model for assessing the level of degradation.

**Formulation of the problem**. Building an approach to assessing the degradation state of a signal under conditions of limited computing resources. To do this, it is necessary to: form a mathematical model of a signal with a degradation component; determine a system of informative temporal, spectral and derivative features; build a regression model for quantitative assessment of the degradation level.

**Solving the problem**. Based on a combination of mathematical modeling of the physical process with feature regression analysis, a windowed dataset was formed based on the simulated signals, similar to a window of data from sensors is captured in real systems. Separately for each window, temporal, spectral, and delta features were calculated, after which a compact regression model was constructed, which provided high accuracy in assessing the level of degradation and confirmed the feasibility of the proposed approach.

To implement such an approach, it is first necessary to model the state evolution process and define informative features for its analysis. Signals of technical systems reflect normal dynamics, degradation processes, and noise disturbances, so it is advisable to describe them with mathematical models. Within this approach, the signal is modeled as the sum of the fundamental, degradation and noise components (1):

$$x(t) = x_{\text{base}}(t) + x_{\text{deg}}(t) + x_{\text{noise}}(t). \quad (1)$$

The fundamental component describes the normal oscillation mode of the system as a superposition of harmonic components. The degradation component is given as the sum of the

damped impulse-resonant responses. To account for the stochastic occurrence of degradation events, the process is appropriately modeled as a Poisson process. And the noise component, respectively $x_{noise}(t) \approx \varepsilon(t)$, $\mathbb{E}[\varepsilon(t)] = 0$. In real systems, the signal is observed with a certain sampling frequency $f_s$, a $t_n = \frac{n}{f_s}, n = 0,1,\dots,N-1$. Then the signal in discrete representation can be written as:

$$x[n] = \sum_{k=1}^{K} A_k \cos\left(2\pi f_k \frac{n}{f_s} + \phi_k\right) + \sum_{i=1}^{I} B_i\, e^{-\gamma(t_n - t_i)} \cos\big(\Omega(t_n - t_i) + \psi_i\big)\, u(t_n - t_i) + \varepsilon[n]. \quad (2)$$

To organize sequential analysis, the signal is divided into a set of windows of length $L$ samples, and the $m$-th window is given as: $x^{(m)}[n] = x[mH + n]$, $n = \overline{0, L-1}$. Therefore, the discrete signal is analyzed in window mode. Thus, for the $m$-th window of length $L$ of simples, a local representation $x^{(m)} \in \mathbb{R}^L$ is formed, where the basic component describes the normal vibrational mode, the degradation component corresponds to impulsive-resonant damage-induced effects, whereas the noise component represents random disturbances. For each $m$-th signal window, a vector $b^{(m)} \in \mathbb{R}^p$ of basic descriptors is first calculated. Next, for each descriptor, a corresponding delta-feature is computed as the difference between its current value and the value in the previous window. As a result, the full feature vector $z^{(m)}$ is formed by concatenating the base descriptors and their deltas, i.e. $z^{(m)} \in \mathbb{R}^d$. After preprocessing and centering, each window is converted into a feature vector:

$$x^{(m)} \in \mathbb{R}^L \to z^{(m)} \in \mathbb{R}^d \to \hat{y}^{(m)}. \quad (3)$$

In (3) $z^{(m)}$ contains the time, envelope, correlation, and spectral descriptors of the signal, and $\hat{y}^{(m)}$ is an estimate of the degradation level for the corresponding window. For each time window, a set of temporals, spectral, envelope, and autocorrelation features was formed, as well as their delta versions relative to the previous window. The main attention was paid to spectral descriptors, since they were considered the most sensitive to degradation changes due to the reflection of energy redistribution in the frequency domain. The informativeness of the basic features was assessed by correlation with the level of degradation and by the ability to distinguish between normal and degradation modes. Thus, the analysis task is reduced to constructing a regression mapping (4).

$$f: \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}, \qquad \hat{y}^{(m)} = f(z^{(m)}; \theta). \quad (4)$$

To experimentally verify the proposed approach, a regression model was constructed, which received a feature vector $z^{(m)}$ an in input and formed an estimate of the degradation level $\hat{y}^{(m)}$, more detailed describes (5). The estimation was performed on a deferred test sample formed at the level of individual runs, which excluded information leakage between related time windows.

$$\begin{gathered} z^{(m)} \xrightarrow{\text{preprocessing}} \tilde{z}^{(m)} \xrightarrow{\text{regression model}} \hat{y}^{(m)} \\ runs \xrightarrow{\text{hold-out } (signal_{id})} \mathcal{D}_{\text{train}}, \mathcal{D}_{\text{test}} \\ \mathcal{D}_{\text{train}} \xrightarrow{\text{grouped CV}} \lambda^* \\ \lambda^* \xrightarrow{\text{fit on full train}} f^* \xrightarrow{\text{test}} Quality\ Assessment \end{gathered} \quad (5)$$

The results showed high accuracy of the model on the test data sample. The use of features of the current window and their increments relative to the previous one confirmed the feasibility of considering the inter-window dynamics of the signal. The increase in error at the late stages of degradation is associated with the complexity of the signal structure. The results of applying the regression model on data simulated by mathematical modeling of the physical process confirm the prospects of the proposed approach and the need for its further validation on real experimental signals.

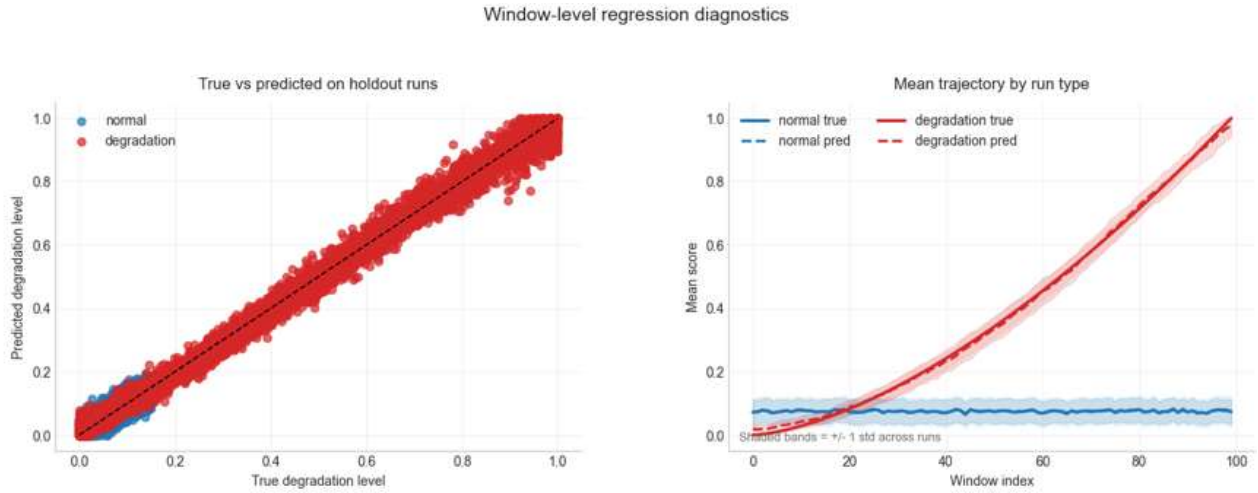



Fig. 1. Diagnostics of window regression estimation: on the left – the ratio of true and predicted values of the degradation level on test implementations; on the right – the averaged trajectories of true and predicted values for the normal and degradation modes

The experimental results obtained show that the proposed characteristic description of the signal is sufficiently informative for building an accurate regression model for assessing the level of degradation. From the figure (Fig. 1), we can see that the regression model provides high consistency between the true and predicted values of the degradation level both at the level of individual windows and at the level of averaged process development trajectories. At the same time, for the normal mode, a stable low level of prediction is observed, while for the degradation mode, a monotonic increase in the state estimate is correctly reproduced.

**Conclusion**. Experimental results showed that combining signal descriptors with a regression model provides an accurate assessment of degradation, and the use of delta features improves quality by considering local dynamics. The novelty of this work lies in the development of a hybrid model for analyzing degradation signals, which combines physically motivated synthetic signal generation with a compact regression model suitable for resource-limited platforms. Also, this work represents the approach in the use of a combined feature description, which includes both current window descriptors and delta features, which consider the dynamics of signal change and increase the efficiency of degradation assessment.

Therefore, the study demonstrates the possibility of building an accurate and computationally efficient degradation assessment model and can be considered as a combination of classical signal processing and machine learning methods for edge intelligence tasks. Further research should be directed at examining the approach on real data, as well as adapting the execution parameters, features, and processing modes to the limitations of microcontroller platforms.

## References

1. C. Tsallis, P. Papageorgas, D. Piromalis, and R. A. Munteanu, “Application-Wise Review of Machine Learning-Based Predictive Maintenance: Trends, Challenges, and Future Directions,” Applied Sciences, vol. 15, no. 9, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15094898.
2. D. Kapoor, D. Gupta, and M. Uppal, “Analyzing the impact of edge, fog and cloud computing on predictive maintenance in the Industrial Internet of Things,” Discov Computing, vol. 28, no. 1, p. 207, Sep. 2025, doi: 10.1007/s10791-025-09653-8.
3. A. Bala et al., “Artificial intelligence and edge computing for machine maintenance-review,” Artif Intell Rev, vol. 57, no. 5, p. 119, Apr. 2024, doi: 10.1007/s10462-024-10748-9.
4. K. Sathupadi, S. Achar, S. V. Bhaskaran, N. Faruqui, M. Abdullah-Al-Wadud, and J. Uddin, “Edge-Cloud Synergy for AI-Enhanced Sensor Network Data: A Real-Time Predictive Maintenance Framework,” Sensors (Basel), vol. 24, no. 24, p. 7918, Dec. 2024, doi: 10.3390/s24247918.
5. M. J. C. S. Reis, “Lightweight Signal Processing and Edge AI for Real-Time Anomaly Detection in IoT Sensor Networks,” Sensors, vol. 25, no. 21, Oct. 2025, doi: 10.3390/s25216629.

# APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INTEGRATED MODELING OF HEAVY OIL RECOVERY IN DEEP RESERVOIRS

**Vashchenko I., Khomenko V.**
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Abstract**. The extraction of heavy oil from deep reservoirs exceeding 3500 m is hindered by complex non-Newtonian fluid rheology and high hydrostatic pressure, rendering natural flow thermodynamically unviable. This study proposes an Integrated Asset Modeling (IAM) framework to develop a digital twin of the reservoir-well-lift system using PETEX software modules PVTP, PROSPER, and MBAL. The methodology encompasses compositional equation-of-state fluid characterization, multiphase nodal analysis, and dynamic 0D material balance simulation. Simulation results prove that integrating an optimized Electrical Submersible Pump (ESP) overcomes hydrostatic barriers, identifying the potential for sustained long-term production throughout the 20-year lifecycle and quantifying the recovery efficiency under active pressure maintenance. Furthermore, conceptual modeling of in-situ catalytic aquathermolysis reveals a synergistic 15.2% increase in absolute open flow potential, providing a commercially robust IT-driven strategy for unconventional deep asset development.

**Keywords**: Heavy Oil, Deep Reservoirs, Integrated Asset Modeling, Digital Twin, Nodal Analysis, Artificial Lift, Equation of State.

**Introduction**. The global depletion of conventional hydrocarbons necessitates a strategic shift toward unconventional heavy oil and natural bitumen reserves. Heavy oil deposits in the Dnieper-Donets Basin and adjacent regions represent strategic reserves for Ukraine's energy security. A representative object is the Yablunivske field, where, despite massive heavy oil reserves of 50 million tons, the current recovery factor remains critically low at 0.039. The primary barriers are the extreme thermobaric conditions at depths exceeding 3500 m and the fluid's highly viscous, non-Newtonian Bingham plastic behavior.

This complex fluid composition, characterized by high asphaltene-resin content, frequently leads to severe asphalt, resin, and paraffin deposits that can plug wellbore equipment and completely halt hydrocarbon production. While chemical treatments, such as nitrite-compound emulsions, have demonstrated effectiveness in dissolving these deposits and increasing oil inflow [2], the continuous mechanical lifting of such viscous fluids remains a profound challenge. The operation of artificial lift systems, such as rod pumps, in deep, high-viscosity environments is highly complicated and requires targeted optimization to increase reliability [3]. Furthermore, the construction and frequent major repairs of these complex deep wells entail significant non-productive time, with hoisting operations alone consuming 25-60% of the total working time [4].

To overcome these multidimensional physical, mechanical, and temporal constraints, the industry is increasingly adopting digital innovations, including IoT-based monitoring and digital twin frameworks [1]. Therefore, achieving comprehensive asset-wide optimization and unlocking the potential of deep heavy-oil reservoirs requires the implementation of advanced Information Technologies, specifically Integrated Asset Modeling (IAM).

**The purpose of the work** is to develop a predictive multilevel IT-modeling algorithm using PETEX software (PVTP, PROSPER, MBAL modules) to forecast well performance dynamics during non-Newtonian oil extraction from deep reservoirs. The study aims to evaluate artificial lift thermodynamic limits and simulate the potential synergy of in-situ thermocatalytic upgrading, rather than providing empirical field results.

**Formulation of the problem**. Standard analytical methods and conventional thermal recovery fail in reservoirs exceeding 3500 m due to extreme thermobaric conditions and severe heat loss. Furthermore, the fluid's non-Newtonian Bingham plastic rheology causes rapid mobility loss during natural lift.

**Solving the problem**. To overcome the severe non-linearities of non-Newtonian fluid behavior at extreme depths (>3500 m, >500 bar), an Integrated Asset Modeling (IAM) methodology

was implemented using the PETEX software suite. The framework establishes a closed-loop Digital Twin that sequentially exchanges data arrays across fluid, wellbore, and reservoir dynamics.

Initially, the PVTP module utilized the Peng-Robinson Equation of State (EOS) to digitally reconstruct the highly unstable fluid, mitigating the physical limitations of deep-well sampling. A critical finding during depletion simulation was the "kinetic delay of gas liberation" (Fig. 1). Due to the strong asphaltene-resin matrix, the fluid maintains anomalously high viscosity far below the bubble point (116 bar), releasing free gas only below 52 bar. Capturing this thermodynamic threshold is vital to prevent catastrophic overestimation of production rates.

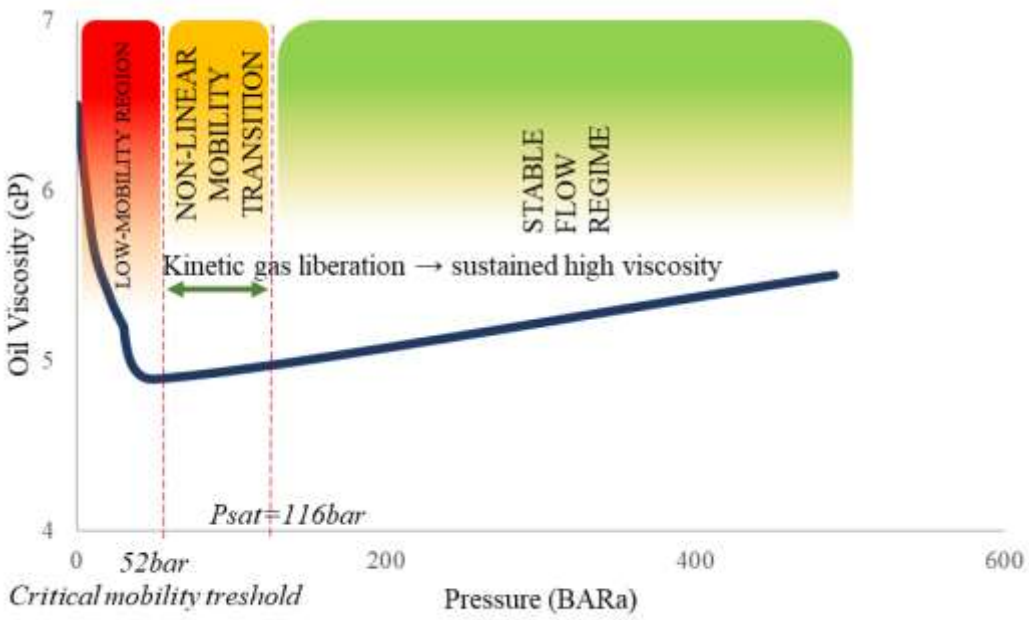



Fig. 1. Kinetic gas liberation delay demonstrating anomalous viscosity retention below the saturation pressure

The calibrated EOS model was seamlessly integrated into the PROSPER module for multi-phase Nodal Analysis. Simulation of natural flow confirmed thermodynamic failure; the massive hydrostatic column causes the Vertical Lift Performance (VLP) curve to rapidly detach from the Inflow Performance Relationship (IPR) curve. To restore system energy, an optimized Electrical Submersible Pump (ESP) was incorporated. The algorithm computationally minimized bottom-hole pressure, artificially shifting the VLP curve downward to intersect the IPR, guaranteeing a stable operating point (Fig. 2).

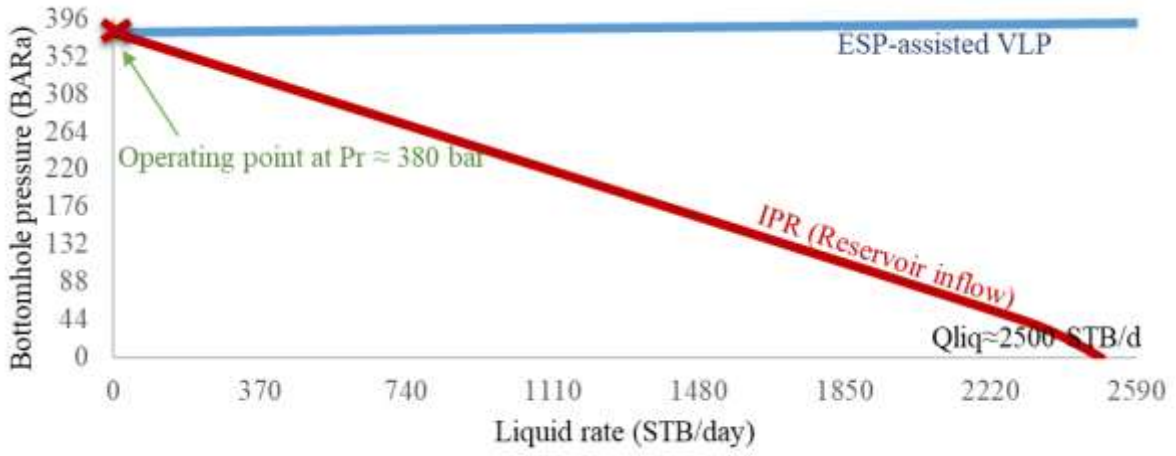



Fig. 2. Nodal analysis illustrating a stabilized operating point achieved through ESP integration

Finally, the MBAL module executed a 20-year dynamic 0D material balance simulation (Havlena-Odeh equation). Stress-testing the Digital Twin through multivariable sensitivity analysis (STOIIP uncertainties and aquifer support) coupled with a deterministic Cash Flow model confirmed the absolute financial resilience of the proposed IT-driven lift strategy.

**Conclusion**. The application of an Integrated Asset Modeling (IAM) framework for deep heavy oil reservoirs yields several critical findings. First, natural depletion at depths exceeding 3500 m is thermodynamically unviable; high hydrostatic resistance and non-Newtonian fluid rheology lead to a rapid loss of well productivity due to thermodynamic instability. Second, the predictive modeling demonstrates that integrating an optimized Electrical Submersible Pump (ESP) system successfully overcomes these hydrostatic barriers. This IT-driven forecast indicates the technical feasibility of maintaining stable flow rates over a 20-year horizon, significantly improving forecasted cumulative recovery compared to natural depletion. Third, proxy modeling confirms a profound synergistic effect when coupling ESP with in-situ catalytic aquathermolysis, which irreversibly reduces fluid viscosity and enhances absolute open flow potential by 15.2%. Finally, multivariable sensitivity analysis verifies the absolute financial resilience of this strategy against geological uncertainties, ensuring a CAPEX payback period of under one month. Future research will focus on expanding the digital twin to include surface gathering networks for field-wide optimization.

## References


1. Wanasinghe, T. R., Wroblewski, L., Petersen, B. K., Gosine, R. G., James, L. A., De Silva, O., Mann, G. K. I., Warrian, P. J.: Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. IEEE Access 8, 104627-104641 (2020). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998723
2. Zholbassarova, A. T., Bayamirova, R. Y., Ratov, B. T., Khomenko, V. L.: Development of technology for intensification of oil production using emulsion based on natural gasoline and solutions of nitrite compounds. SOCAR Proceedings, 48-55 (2024). https://doi.org/10.5510/OGP20240200965
3. Togasheva, A., Bayamirova, R., Ratov, B., Sudakov, A., Makyzhanova, A.: Well operation by plunger rod pumps in difficult conditions. Scientific Bulletin of National Mining University, 22-27 (2025). https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/022
4. Khomenko, V., Pashchenko, O., Ratov, B., Kirin, R., Svitlychnyi, S.: Optimization of the technology of hoisting operations when drilling oil and gas wells. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1348(1), 012008 (2024). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012008

# ADAPTIVE ROBUST SHIP MOTION CONTROL SYSTEM'S SIMULATION MODEL CONCEPT

**Vychuzhanin V., Vychuzhanin A., Rudnichenko N., Grishin S., Shibaeva N.**
Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

**Abstract**. The paper addresses the problem of synthesizing an intelligent simulation model (ISM) for the adaptive robust motion control of an autonomous ship under storm conditions and parametric uncertainty. The proposed architecture integrates sliding mode control (SMC), square-root unscented Kalman filter (SRUKF), and a disturbance observer (DOB) under the management of event-based supervisory logic. Based on a "digital testing ground" (MATLAB/Simulink, Esso Osaka tanker), drift identification with an error of less than 6% was ensured, and a proactive compensation channel (feed-forward) was implemented. The use of adaptive SMC reduced actuator wear by 40% and maintained stability during object parameter variations of up to 25%. The "crab-wise motion" strategy enabled an 88% reduction in cross-track error (from 45 m to 3.6 m). The ISM serves as a basis for designing autonomous ships, integrating Reinforcement Learning, and creating digital twins.

**Keywords**: Intelligent Control Systems, Robust Control, Sliding Mode Control, Unscented Kalman Filter, Disturbance Observer, Simulation Modeling, Autonomous Ships, Ship Motion Control, MATLAB/Simulink.

**Introduction**. The development of autonomous ships requires a transition from classical control approaches to resilient systems capable of operating under nonlinear storm disturbances. An important role is played by simulation models acting as "digital testing grounds," which enable the verification of robust control algorithms under stochastic wave impacts (e.g., JONSWAP spectra) without risk to real vessels [1–3]. A key problem in such systems is the limitation of sliding mode control due to chattering and actuator wear, which necessitates the development of adaptive and intelligent control mechanisms. A feature of modern research is the integration of physically accurate ship dynamics models with advanced estimation and control algorithms within simulation environments such as MATLAB/Simulink. Special attention is given to the identification of external disturbances, where traditional "white noise" assumptions are replaced by more realistic colored noise models, requiring nonlinear disturbance observers and filtering techniques [4–6]. The use of unscented Kalman filters in combination with observers enables real-time estimation of unmeasured forces and supports proactive control strategies. This scientific and applied problem is addressed by combining nonlinear motion models, adaptive filtering (UKF, SRCKF), and robust control methods, which together improve trajectory tracking accuracy and system stability under uncertainty. At the same time, an important challenge remains the integration of stochastic environmental effects into closed-loop control systems while maintaining computational efficiency and real-time performance [7–9].

**The purpose of the work** is to develop criteria and algorithmic support for implementing an adaptive robust intelligent simulation model of ship motion control, based on the integration of SRUKF–DOB and adaptive SMC, ensuring stable trajectory tracking and proactive compensation of stochastic storm disturbances under real-time conditions.

**Formulation of the problem**. Analysis of existing control and estimation methods shows that, under nonlinear hydrodynamics and stochastic marine disturbances, the accuracy of state vector estimation and control actions becomes a variable and uncertain value. The insufficient integration of filtering algorithms with robust control, as well as the simplification of environmental models, leads to reduced stability and adaptability of autonomous ship systems, especially under extreme operating conditions.

**Solving the problem**. The synthesis of intelligent motion control systems for an autonomous ship requires the development of a mathematical core that is adequate not only in terms of physical fidelity but also in reproducing complex dynamic effects critical for verifying robustness algorithms. Within the framework of the study, the object is formalized as a nonlinear multi-input

multi-output (MIMO) system with three degrees of freedom (3-DOF), functioning under conditions of parametric and stochastic uncertainty.

The object dynamics in the body-fixed frame are formalized as a nonlinear operator equation, accounting for the effects of added masses and viscous friction [7, 8]:

$$M\dot{v} + +C(v)v + D(v)v = \tau_{ctrl} + \tau_{env}, \quad (2)$$

where $v = [u, v, r]^T$ is the velocity vector; $u$, $v$, $r$ are surge, sway, and yaw velocities in the body-fixed frame; $M \in R^{3x3}$ is the symmetric positive definite inertia matrix, defining the system's mass and its inertial redundancy considering added water masses [9]; $C(v) \in R^{3x3}$ is the skew-symmetric Coriolis operator, generating nonlinear accelerations during curved motion (Coriolis and centripetal force matrix); $D(v) \in R^{3x3}$ is the damping operator, approximated by second-order polynomials to model turbulent effects and viscous resistance (nonlinear hydrodynamic damping matrix); $\tau_{ctrl} = [X, Y, N]^T$ is the vector of forces and moments of the propulsion and steering system, verified based on CFD calculations [3]; $\tau_{env}$ is the vector of structured external disturbances (total moment and forces from wind, current, and the JONSWAP wave profile).

To ensure navigational accuracy, the model separates the absolute velocity $v_{||}$ (relative to ground) and the relative velocity $v_{rel}$ (relative to water), allowing for the correct modeling of current influence Vc and the resulting drift [6]:

$$v_{rel} = v_{||} - [V_c \cos(\psi_c - \psi), V_c \sin(\psi_c - \psi), 0]^T. \quad (3)$$

Kinematic equations in the Earth-fixed frame:

$$\dot{x}_q = u \cdot \cos(\psi) - v \cdot \sin(\psi), \dot{y}_q = u \cdot \sin(\psi) - v \cdot \cos(\psi), \ \dot{\varphi} = r. \quad (4)$$

The goal of the experiment is to confirm the system's robustness under a critical mismatch between the object (Plant) and controller parameters. The Esso Osaka tanker (m = 2.3x107 kg, L = 160 m) with nonlinear 3-DOF dynamics, including added masses and damping in the Surge, Sway, and Yaw channels, was chosen as the object. Modeling in MATLAB R2024b/Simulink was implemented via S-Function Level-2 (object) and MATLAB Function blocks (controller/supervisor) using the ode4 (Runge-Kutta) solver and a step $\Delta t$ = 0.1 s (10 Hz). To verify robustness, a "critical uncertainty" scenario was implemented: ship mass increased by 25%, rudder efficiency reduced by 20%, and the external environment simulates a JONSWAP storm with a 1.5 m/s side current at nominal controller settings. The resulting 600-second time series, processed by the run_ship_simulation.m script, represent a direct visualization of physical processes and guarantee 100% compliance of the graphs with the mathematical laws of robust control.

The novelty of the proposed structure in MATLAB/Simulink is based on the hierarchical integration of information and control loops (Fig. 1). For numerical experiments and verification of the proposed algorithms, a structural-functional diagram of the ISM was developed for implementation in the MATLAB/Simulink software package. Quantitative results show an 88% reduction in integral trajectory error, along with decreased actuator wear, confirming that the SRUKF-DOB and adaptive SMC synergy ensures navigational survivability under high uncertainty. Verification demonstrates that integrating the SRUKF-DOB into the adaptive SMC loop delivers precise navigation in extreme conditions. Proactive compensation enables adaptive ship orientation ("crab-wise motion"), reducing lateral deviation by 88% and actuator loads by 40%. The ISM was comprehensively verified using a multi-level approach. Theoretical validity is confirmed via Fossen's hydrodynamics and Lyapunov analysis, with trajectory convergence to the sliding surface in 15–18 s demonstrating algorithm correctness. Physical adequacy is ensured by realistic ship coefficients, JONSWAP-based stochastic environment, and actuator nonlinearities. Methodological adequacy of the SRUKF-DOB "virtual sensor" is proven by <6% moment identification error, enabling proactive drift compensation. Navigational adequacy is shown by automatic "crab-wise motion," forming an anticipation angle to counter lateral drift. Quantitative verification under 25% parametric uncertainty confirms robust performance, reducing IAE by 88% and TV by 40%. Together, these results demonstrate that the ISM reliably reproduces real ship behavior and serves as a digital testbed for autonomous ship control systems.

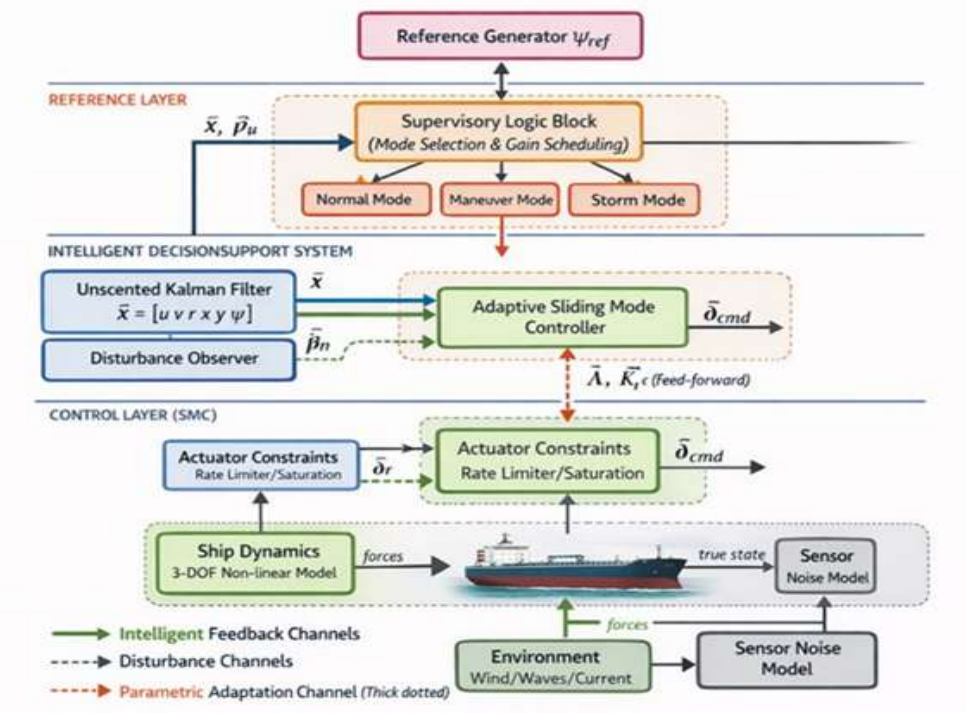



Fig. 1. Structural-functional diagram for ISM implementation in the MATLAB/Simulink environment

**Conclusion**. This work addresses the synthesis of an ISM for adaptive robust ship motion control, ensuring navigational survivability under extreme stochastic disturbances and parametric uncertainty. The solution integrates a nonlinear 3-DOF ship model, a modified SRUKF-DOB observer, and an adaptive SMC with supervisory logic. A physically realistic model of the Esso Osaka tanker with JONSWAP wave forces validated storm-load reproduction up to 2.0x107 Nm. The SRUKF observer, acting as a virtual sensor, identified drift forces with <6% error, enabling a proactive feed-forward channel. The hybrid SMC with dynamic parameter tuning eliminated chattering and reduced actuator wear by 40% (TV criterion). Under 25% inertial uncertainty, the ISM maintained the “crab-wise motion” strategy, reducing lateral deviation by 88% and achieving trajectory tracking within 3.6 m. The study provides a high-fidelity digital testbed for autonomous ship control verification in extreme conditions. Future work includes integrating deep reinforcement learning for supervisory optimization, extending to multi-agent maneuver.

## References


1. Menges, D., Rasheed, A.: An Environmental Disturbance Observer Framework for Autonomous Surface Vessels. In: Ocean Engineering, vol. 285, Art. no. 115412, (2023).
2. Syntakas, S., Vlachos, K.: Safe Sliding Mode Control for Marine Vessels Using High-Order Control Barrier Functions and Fast Projection. In: arXiv preprint, arXiv:2512.24281, (2025).
3. Zhang, Y. et al.: Robust Fixed-Time Adaptive Fault-Tolerant Control for Dynamic Positioning of Ships with Thruster Faults. In: Applied Sciences, Art. no. 5738, (2024).
4. Ye, Y. et al.: An Adaptive Sliding Mode Controller Using Predictive Scheme for Dynamic Positioning: Numerical and Physical Docking Operation. In: Ocean Engineering, vol. 317, Art. no. 119911, (2025).
5. Chen, Z. et al.: Adaptive Sliding Mode Control Design for Nonlinear Unmanned Surface Vessel Using RBFNN and Disturbance-Observer. In: IEEE Access, vol. 8, pp. 45457–45467, (2020).
6. Chen, Q. et al.: Fixed-Time Adaptive Integral Sliding Mode Control for Unmanned Vessel Path Tracking Based on Nonlinear Disturbance Observer. In: Applied Sciences, vol. 15, no. 19, Art. no. 10368, (2025).
7. Wang, L. et al.: State-of-the-Art Research on Motion Control of Maritime Autonomous Surface Ships. In: Journal of Marine Science and Engineering, vol. 7, no. 12, Art. no. 438, (2019).
8. Tomera, M. et al.: Control of Dynamic Positioning System with Disturbance Observer for Autonomous Marine Surface Vessels. In: Sensors, vol. 21, no. 15, Art. no. 6723, (2021).
9. Wang, Y. et al.: Kinematic Motion Models Based Vessel State Estimation to Support Advanced Ship Predictors. In: Ocean Engineering, vol. 286, Art. no. 115503, (2023).

# CONCEPTUAL MODEL OF HYBRID CONTROL OF ROBOTIC SYSTEMS WITH DELEGATION OF AUTHORITY

**Yarmilko A., Marchenko S.**
Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. This paper proposes a delegation-of-authority model for hybrid human–machine control aimed at adaptive redistribution of control between the operator and an autonomous robotic system under dynamic mission conditions. The proposed model coordinates the choice of autonomy level with mission context, event criticality, system reactivity, and operator participation while accounting for temporal and safety constraints of control transfer. It was found that the admissibility of delegated authority depends on the current mission conditions, the characteristics of incoming events, the reactivity of the computational platform, and the ability of the operator to intervene without violating established constraints. The combined use of these factors enables justified selection and adjustment of control modes, supports stable delegation decisions, and creates a basis for applying the proposed approach in hierarchical mission planning, adaptive control, and dynamic mission replanning of robotic systems.

**Keywords**: Hybrid Human-Machine Control, Autonomy Level, System Reactivity, Event Criticality, Adaptive Control, Robotic Systems.

**Introduction**. The development of robotic systems operating in open environments is accompanied by an increasing level of autonomy; however, the complete removal of the operator from the control loop ensures neither universal effectiveness nor sufficient flexibility under conditions of environmental uncertainty. For complex missions, a coordinated combination of autonomous and manual control proves to be more effective. Within this approach, the operator and the robotic system are considered components of a unified decision-making loop, in which not only the distribution of authority changes, but also the nature of their interaction [1–3].

The conceptual problem lies not in the automation of individual functions as such, but in the construction of a coordinated delegation mechanism that enables adjustment of the operator's degree of involvement depending on the mission state, platform condition, communication availability, human cognitive capabilities, and system time constraints [2–4]. Therefore, delegation of authority should be regarded as an internal function of hybrid control.

Additional complexity arises from the temporal costs associated with delegation. The transfer of authority requires the formation of a control decision, its interpretation and implementation, and, when the operator is involved, the restoration of situational awareness as well. Thus, the admissibility of delegation is determined not only by mission logic, but also by system reactivity [5, 6]. Under such conditions, the conceptual model should integrate three aspects: the structure of the system state, the delegation procedure, and reactivity as a constraint on admissible control modes.

**The purpose of the work** is to develop a conceptual model of hybrid control for robotic systems in which the delegation of authority between the operator and the autonomous subsystem is determined through the aggregated state $S_k$, while the admissibility of control modes is defined through the effective reactivity index $R_{eff}$.

**Formulation of the problem**. Hybrid control of robotic systems requires formalization of the procedure for delegating authority between the operator and the autonomous subsystem under conditions of limited reactivity. The problem is to construct a model that provides a coherent representation of the system state based on heterogeneous data; determines delegation parameters as a function of this state; incorporates reactivity as a constraint on the admissibility of decision-making; and closes the control loop through the feedback influence of delegation on the subsequent dynamics of the system.

**Solving the problem**. The conceptual model (Fig. 1) organizes the transition from observations to delegation parameters through a sequence of coordinated transformations. The signal level forms a feature representation $Z_k$ on a discrete time grid with step size $k$, in which the current system state is represented across all information channels. Differences in channel

dynamics and update rates require their alignment to a consistent temporal scale, which is performed by the operator $\mathrm{T}(\cdot)$, ensuring the correctness of subsequent integration.

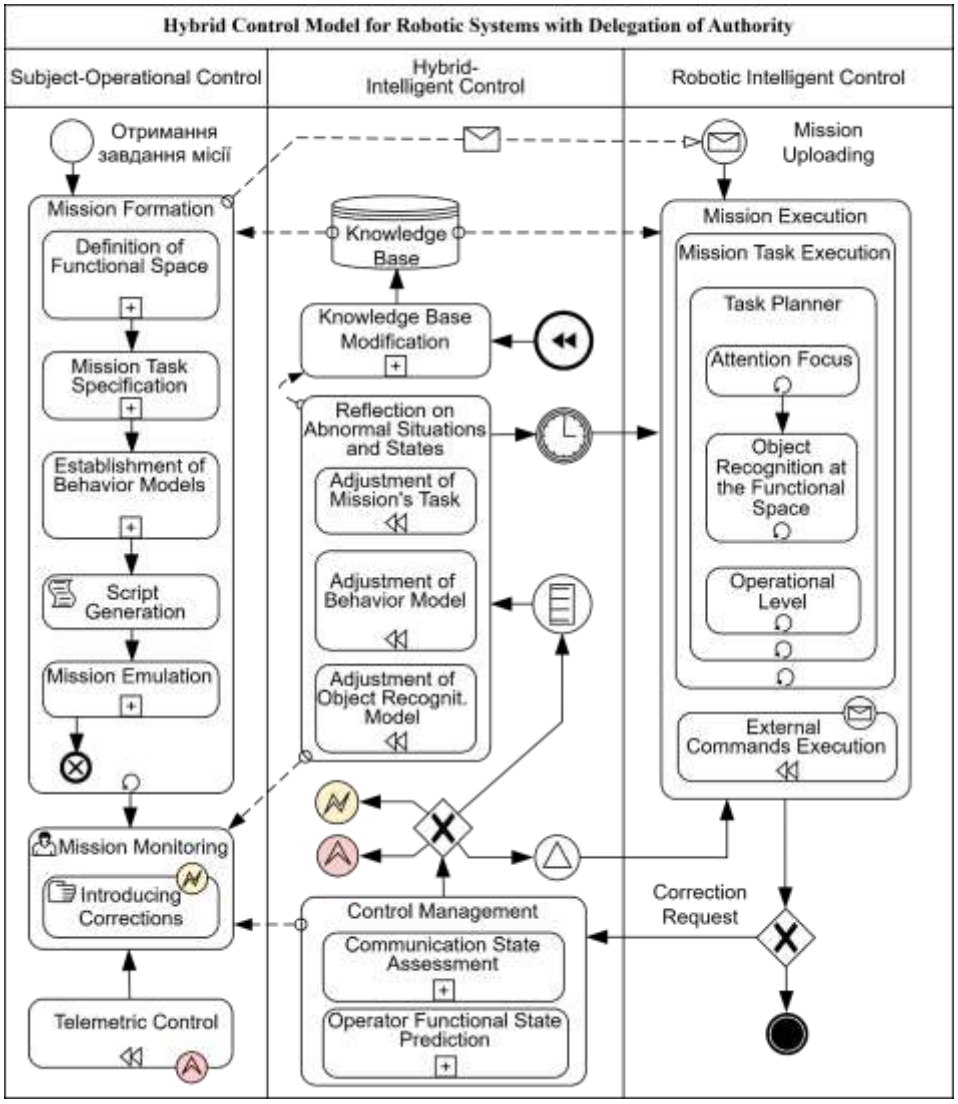



Fig. 1. Hybrid Control Model for Robotic Systems with Delegation of Authority

The feature level performs channel-wise interpretation of the state. Based on $Z_k$ estimates $S_k^{(c)}$ are formed, each corresponds to a separate aspect of system functioning. The contribution of channels to the overall state is defined by confidence coefficients $\gamma_k$, after which the aggregation operator $\mathrm{A}(\cdot)$ is applied, resulting in the formation of the integrated state $S_k$.

Reactivity assessment is performed in parallel with state formation. Taking into account the propositions in [6], the initial estimate of the reactivity state is determined as

$$R_k = R_k^{hard} \cdot \left(\beta_1 R_k^{soft} + \beta_2 R_k^{bg}\right), \beta_1 + \beta_2 = 1, \quad (1)$$

is based on the non-compensatory reactivity of critical deadlines $R_k^{hard}$ and the weighted sum of the influence of processes with soft deadlines $R_k^{soft}$ and background processes $R_k^{bg}$. Their computation is performed with consideration of the set of events $E$ of the corresponding class (hard, soft, background), admissible deadlines $D_i$ for event $i$, the estimated reaction time $T^{resp}$, the computational subsystem load factor $L_k^{sys}$ and the time window for soft deadlines $\Omega_k$. The resulting aggregated state

$$X_k = \left(x_k, m_k, h_k, n_k, r_k, e_k\right), \quad (2)$$

where $x_k$ represents the spatial state of the platform, $m_k$ denotes the mission state, $h_k = (W_k, F_k, A_k)$ represents the operator state based on the thresholds of cognitive load $W_k$, fatigue $F_k$, and attention $A_k$, $n_k = \left(QoS_k, d_k^{net}\right)$ denotes the network channel state based on the integrated network channel assessment $QoS_k$ and the channel degradation margin $d_k^{net}$, $r_k = \left(U_k, T_k^{crit}, P_k^{crit}, R_k\right)$ denotes the reactivity state based on the utilization level of the platform's computational resources $U_k$, the estimate of critical temporal losses $T_k^{crit}$, the predictive estimate of the probability of violating time constraints $P_k^{crit}$ and the reactivity index $R_k$, while $e_k$ denotes the energy mode. Considering that the reactivity of the operator-platform system depends on the control mode $q \in Q$, the effective reactivity index is further determined as a function of the available residual time $\rho_k^{(j,q)}$ until deadline $T_{deadline}^{(j)}$

$$\tilde{R}_k^{(i,q)} = \min\left\{R_k, \rho_k^{(j,q)}\right\}, \tag{3}$$

and the set of admissible control modes

$$Q_k^{adm} = \left\{q \in Q : \tilde{R}_k^{(i,q)} \geq \theta_R^{\min} \wedge E_k^{crit}(q) = 0\right\}, \tag{4}$$

where $E_k^{crit}(q)$ denotes the abnormal-event indicator. The selection of the optimal mode from the set of admissible modes is performed based on the integrated system reactivity indicator $S_k$. In the simplest case, threshold values may be defined for each control level, with hysteresis introduced to prevent oscillations (chattering) during mode switching.

**Conclusion**. The analysis of approaches to authority delegation in hybrid human-machine control made it possible to propose a conceptual model that aligns the selection of the autonomy level with mission conditions, event criticality, robotic system reactivity, and operator involvement. The developed model provides a formal basis for adaptive redistribution of control between the operator and the autonomous system under conditions of a changing execution context.

The proposed approach makes it possible, at the first stage, to assess mission conditions, operator state, and the admissibility of control modes during execution, and, at the second stage, to select or adjust the degree of delegated authority and implement the corresponding control transition subject to established constraints. The integration of reactivity assessment, event criticality analysis, and admissibility conditions within a unified mechanism ensures adaptive delegation while preserving safety guarantees and controlled operator intervention. Such a delegation model is appropriate for application under conditions of dynamic changes in mission parameters, external disturbances, or computational context, when a justified redistribution of authority between automated processes and the operator is required.

## References


1. Dragan A. D., Srinivasa S. S. A policy-blending formalism for shared control. *The International Journal of Robotics Research*. 2013. Vol. 32, no. 7. pp. 790–805. DOI: 10.1177/0278364913490324.
2. Chiou M., Hawes N., Stolkin R. Mixed-initiative variable autonomy for remotely operated mobile robots. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*. 2021. Vol. 10, no. 4. Art. 37. pp. 1-34. DOI: 10.1145/3472206.
3. Chen D. et al. Advancing Human-Machine Teaming: Concepts, Challenges, and Applications: preprint. arXiv. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.16518.
4. Wang P., Wang H., Zhang H. Cognitive workload assessment in aerospace scenarios: a cross-modal transformer framework for multimodal physiological signal fusion. *Multimodal Technologies and Interaction*. 2025. Vol. 9, no. 9. Art. 89. DOI: 10.3390/mti9090089.
5. Masalskyi V., Dzedzickis A., Korobiichuk I., Bučinskas V. Hybrid mode sensor fusion for accurate robot positioning. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 10. Art. 3008. DOI: 10.3390/s25103008.
6. Turkin I. B., Liubimov O. V., Volobuieva L. O. Model reaktyvnosti vbudovanykh obchysliuvalnykh system nanosuputnykiv i BPLA (In Ukrainian). *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia*. 2025. No. 6(208). pp. 128–142. DOI: 10.15421/aktt.2025.6.12.

# COMPARATIVE EFFICIENCY ANALYSIS OF PMM3 ESTIMATORS FOR LINEAR REGRESSION WITH SYMMETRIC BIMODAL ERRORS

**Zabolotnii S.[1,2], Chepynoha A.[3], Klopotovskyi P.[3]**

[1]Cherkasy State Business College, Cherkasy, Ukraine
[2]State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Cherkasy, Ukraine
[3]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper addresses the estimation of linear regression parameters under symmetric non-Gaussian errors following the Two-piece Normal (TN) distribution. Three methods are compared: Ordinary Least Squares (OLS), Maximum Likelihood for TN (MLE-TN), and the third-power Polynomial Maximization Method (PMM3). PMM3 is semi-parametric and relies only on sample moments of order two, four, and six. A Monte Carlo study ($M$ = 500, $n \in \{46, 100, 200, 500\}$) confirms theoretical predictions: PMM3 achieves up to 95.5% variance reduction over OLS at $\lambda$=5 and remains robust under model misspecification, while MLE-TN may lose efficiency. Applied to Fisher's Iris versicolor data ($n$=50, $\gamma_4$=–0.966), PMM3 achieves 43% bootstrap variance reduction. The empirical efficiency threshold is $\gamma_4 \lesssim -0.7$.

**Keywords:** polynomial maximization method, linear regression, two-piece normal distribution, maximum likelihood, estimation efficiency, Monte Carlo simulation.

**Introduction.** The classical Ordinary Least Squares (OLS) method, proposed by Gauss in 1809, serves as the Best Linear Unbiased Estimator (BLUE) under the assumption of Gaussian error distribution. However, when deviations from normality occur, OLS loses its asymptotic optimality. In such cases, alternative estimators based on modified likelihood can provide significantly lower variance [1]. In practical applications within metrology, medicine, and natural sciences, errors often exhibit symmetric yet non-Gaussian distributions. In particular, platykurtic distributions (excess kurtosis $\gamma_4<0$) arise in measurements with limited ranges, the aggregation of multiple uniform-type error sources, and similar contexts [2].

One important class of such distributions is the two-piece normal (TN) distribution, formally described in classical statistical literature in [3] and generalized in [4]. The TN distribution covers a spectrum of shapes, ranging from nearly Gaussian ($\lambda \approx 0$) to bimodal ($\lambda > 1/\sqrt{2}$), while remaining symmetric. There are two fundamentally different approaches to improving estimation efficiency: the parametric MLE-TN, which jointly estimates all parameters and achieves the Cramer-Rao bound under correct specification, and the semi-parametric PMM3, which utilizes only sample moments without requiring prior knowledge of the distribution's functional form [5].

**Problem Statement.** Despite existing research on the use of PMM3 for general symmetric distributions [6, 7] and MLE-TN [4], a systematic direct comparison between PMM3 and MLE-TN within the framework of the TN model has not yet been conducted. The TN distribution differs from previously studied distributions in that its cumulants are analytically known and precise, allowing for the parametric application of MLE-TN, which reaches the Cramer-Rao bound.

**The aim of this work** is to conduct a theoretical and Monte Carlo comparison of three linear regression parameter estimation methods (OLS, PMM3, and MLE-TN) under TN-distributed errors, explore their robustness against misspecification, and determine the empirical efficiency threshold for PMM3.

**Solving the problem.** This study considers a linear regression model:

$$y_v = x_v^T \beta + \varepsilon_v, \tag{1}$$

where $\varepsilon_v$ are independent and identically distributed errors.

PMM3 estimates only the $p$-dimensional vector parameter $\beta$, applying adjustments based on the posterior moments of OLS residuals using the Newton-Raphson iterative refinement algorithm. In this case, the theoretical efficiency coefficient is given by:

$$g_3 = 1 - \frac{\gamma_4^2}{6 + 9\gamma_4 + \gamma_6}\ , \qquad (2)$$

where $\gamma_4$ and $\gamma_6$ are fourth and sixth-order cumulant coefficients [5].

Monte Carlo simulation was conducted with $M$=500 replications for sample sizes $n \in \{46, 100, 200, 500\}$ with parameter $\lambda \in \{0{,}5; 1{,}0; 1{,}5; 2{,}0; 3{,}0; 5{,}0\}$. The results showed that PMM3 significantly outperforms OLS for $\lambda \geq 1{,}5$, with a relative variance reduction factor (VRF) of the estimates ranging from 1.5 to 23.8. The empirical coefficient $\tilde{g}_3$ converges to the theoretical within an accuracy off ±10% at $n \geq 100$. MLE-TN is even more efficient than PMM3 under correct TN specification; however, it estimates $p$+2 parameters, which leads to overparameterization at small $n$.

Robustness analysis showed that under misspecification (uniform, triangular, logistic, and $t_{10}$ distributions), PMM3 maintains a VRF≈1,0 of across all distributions, meaning it performs no worse than OLS even when assumptions are violated. In contrast, MLE-TN can perform worse than OLS (VRF=0,969 for the triangular distribution). The Newton-Raphson convergence for PMM3 reached 100% across all 24 Monte Carlo blocks, including bimodal TN cases ($\lambda$=3,5).

On real-world data (Iris versicolor, $n = 50$, $\hat{\gamma}_4$=–0,966), PMM3 is the best performer according to both criteria: LOO-MSE=0,2022 (OLS: 0,2070; MLE-TN: 0,2109), with a bootstrap $\tilde{g}_3 = 0{,}570$ (a 43% reduction in variance). MLE-TN proved to be the worst-performing method due to overparameterization at a small sample size. The empirical efficiency threshold for PMM3, confirmed across seven datasets, is $\gamma_4 \lesssim -0{,}7$.

**Conclusions.** Summarizing the research and results obtained, the following key takeaways can be identified: 1) PMM3 provides a variance reduction ranging from 7% to 95.5% compared to OLS for TN-distributed errors; 2) MLE-TN is significantly more efficient under correct specification and large sample sizes but remains unstable under misspecification; 3) PMM3 is robust (VRF≈1,0 for any symmetric distribution), making it a safe choice when the distributional form is uncertain; 4) practical threshold: PMM3 is recommended when $\gamma_4 \lesssim -0{,}7$; for $\gamma_4 > -0{,}7$, all methods are practically equivalent to OLS.

## References


1. Tiku, M. L., Islam, M. Q., & Selçuk, A. S. (2001). Non-normal regression. II. Symmetric distributions. Communications in Statistics: Theory and Methods, 30(6), pp. 1021–1045.
2. Johnson, N. L., Kotz, S., & Balakrishnan, N. (1994). Continuous univariate distributions (Vol. 1). Wiley. 784 p.
3. John, S. (1982). The three-parameter two-piece normal family of distributions and its fitting. Communications in Statistics: Theory and Methods, 11(8), pp. 879–885.
4. Salinas, H., Bakouch, H., Qarmalah, N., & Martínez-Flórez, G. (2023). A flexible class of two-piece normal distribution with a regression illustration to biaxial fatigue data. Mathematics, 11(5), pp. 1-14.
5. Kunchenko, Y. P. (2002). Polynomial parameter estimations of close to Gaussian random variables. Shaker Verlag. 396 p.
6. Zabolotnii, S.W., Warsza, Z.L., Tkachenko, O. (2020). Estimation of Linear Regression Parameters of Symmetric Non-Gaussian Errors by Polynomial Maximization Method. In: Szewczyk, R., Zieliński, C., Kaliczyńska, M. (eds) Automation 2019. AUTOMATION 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 920. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13273-6_59.
7. Zabolotnii, S., Khotunov, V., Chepynoha, A., & Tkachenko, O. (2021). Estimating parameters of linear regression with an exponential power distribution of errors by using a polynomial maximization method. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(4 (109), 64–73. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225525.

# КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Аль-Амморі Алі[1], Дяченко П.В.[2]**
[1]Національний транспортний університет, м. Київ, Україна
[2]Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація**. У роботі розглянуто особливості аналізу перехідних процесів в електродвигунах транспортних систем, які суттєво впливають на надійність, енергоефективність та безпеку експлуатації транспорту. Досліджено основні динамічні режими роботи електромеханічних систем: пуск, електричне гальмування, зміну навантаження та аварійні режими. Показано, що вивчення зазначених процесів потребує застосування математичного моделювання, чисельних методів розв'язування систем диференціальних рівнянь та сучасних інформаційних технологій. Проаналізовано вплив пускових струмів, режимів рекуперативного і динамічного гальмування, а також стохастичних змін навантаження на роботу електроприводів. Особливу увагу приділено використанню систем автоматичного регулювання для забезпечення оптимальних параметрів перехідних процесів. Розглянуто можливості застосування апарату передатних функцій для математичного опису систем керування. Визначено підходи до кількісної оцінки якості перехідних процесів. Обґрунтовано доцільність використання сучасних інформаційних технологій, зокрема Matlab-Simulink для моделювання та аналізу режимів роботи електродвигунів на транспорті.

**Ключові слова**: інформаційна технологія, перехідний процес, динамічний режим роботи, система автоматичного керування, оцінка ефективності регулювання.

# QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF AUTOMATIC REGULATION SYSTEMS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

**Ali Al-Ammouri[1], Dyachenko P.V.[2]**
[1]National Transport University, Kyiv, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper considers the features of the analysis of transient processes in electric motors of transport systems, which significantly affect the reliability, energy efficiency and safety of transport operation. The main dynamic modes of operation of electromechanical systems are investigated: starting, electric braking, load change and emergency modes. It is shown that the study of these processes requires the use of mathematical modeling, numerical methods for solving systems of differential equations and modern information technologies. The influence of starting currents, regenerative and dynamic braking modes, as well as stochastic load changes on the operation of electric drives is analyzed. Special attention is paid to the use of automatic control systems to ensure optimal parameters of transient processes. The possibilities of using the transfer function apparatus for the mathematical description of control systems are considered. Approaches to quantitative assessment of the quality of transient processes are determined. The feasibility of using modern software tools, in particular Matlab-Simulink for modeling and analyzing the operating modes of electric motors in transport is substantiated.

**Keywords** information technology, transient process, dynamic operating mode, automatic control system, assessment of regulation efficiency.

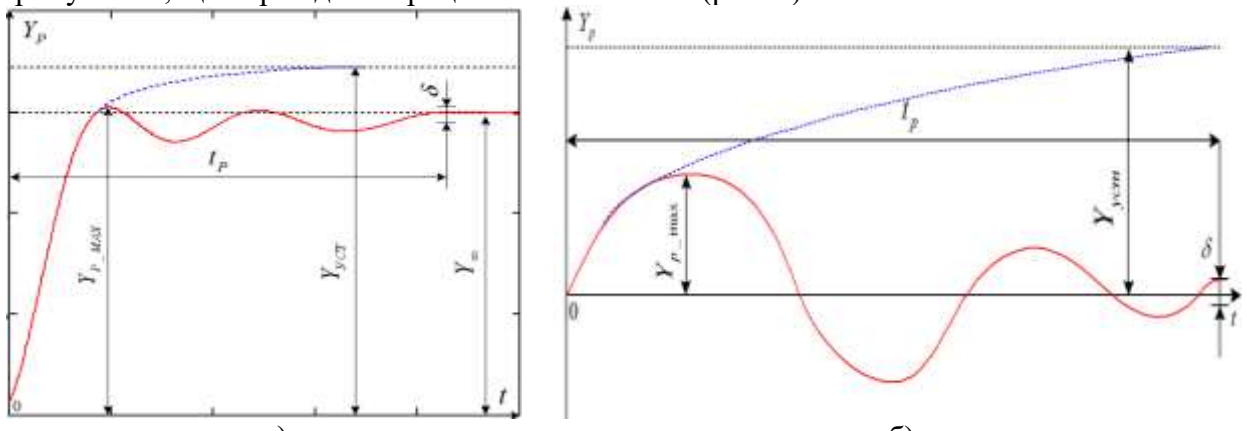
**Вступ.** Аналіз перехідних процесів в електродвигунах, що застосовуються на транспорті є ключовим аспектом для забезпечення надійності, ефективності та безпеки руху. Такі процеси виникають при пуску, гальмуванні, зміні навантаження та інших позаштатних ситуаціях, а їх вивчення потребує комплексного підходу, що поєднує теорію, математичне моделювання та експериментальні дані [1]. В електроприводах транспортних машин перехідні процеси прийнято розділяти на три основні типи – механічні, електромагнітні та електромеханічні. Для вивчення цих складних явищ використовується декілька підходів, зокрема математичне моделювання, як основний інструмент дослідження, та експеримент, що дозволяє верифікувати моделі [1, 2].

**Мета роботи.** Метою роботи є дослідження особливостей використання сучасних інформаційних технологій і програмних засобів для математичного моделювання основних динамічних режимів роботи електричних двигунів на транспорті, та визначення правил для кількісної оцінки ефективності систем автоматичного регулювання, придатної для забезпечення оптимальних перехідних режимів їх роботи.

**Постановка задачі.** Відомо, що до основних динамічних режимів роботи електромеханічних систем, зокрема на транспорті, належать пуск, електричне гальмування та аварійні режими [1, 2]. Пусковий режим є одним з найбільш критичних для транспортних систем, за умови високої частоти комутації (70-80 разів за робочий цикл). Особливістю його є те, що пуск потужного асинхронного двигуна, викликає стрибки струму, у 5-7 разів вище номінального, що створює ударні навантаження на трансмісію, і викликає просадки напруги у мережі. Електричне гальмування дає змогу перетворювати кінетичну енергію руху в електричну. В залежності від використовуваної системи, це може бути рекуперативне гальмування (повернення енергії у мережу), динамічне (гасіння енергії на гальмувальних резисторах) або противключення. Аналіз цих режимів важливий для оцінки енергоефективності і зношення обладнання. Зміна навантаження та аварійні режими пов'язані з постійною зміною умов руху транспорту – рушання з місця, долання підйомів, проковзування колісних пар. Перехідні процеси тут носять стохастичний характер. Окрім того, окремо досліджуються аварійні режими, такі як переключення шин електроживлення при збоях у мережі. У цей момент виникають специфічні асиметричні режими з великими урівнюючими струмами.

Сучасні дослідження спрямовані на розробку інтегрованих моделей, що дозволяють інтегрувати відмови, оптимізувати системи керування, проектувати системи електропостачання [2]. Аналіз перехідних процесів у електродвигунах транспортних систем призводить до необхідності розв'язування систем диференціальних рівнянь, що може бути реалізовано методами чисельного диференціювання. Досягнення необхідної якості параметрів перехідних процесів у транспортних системах з електроприводом може бути реалізовано на основі застосування систем автоматичного регулювання (САР). Для математичного опису САР використовується апарат передатних функцій. Враховуючи вище сказане, у дослідженні передбачено вирішення таких основних завдань: розгляд та детальний аналіз загальноприйнятих прямих кількісних оцінок якості системи автоматичного керування статичним об'єктом; визначення правил опосередкованої оцінки границь перехідного процесу в системі автоматичного керування двигуном транспортної системи; дослідити основні аспекти, можливості та переваги використання інформаційних технологій для реалізації кількісної оцінки ефективності систем автоматичного регулювання електричними машинами на транспорті.

**Основна частина.** Розглянемо загальноприйняті прямі кількісні оцінки ефективності на прикладі системи автоматичного регулювання (САР), зі статичним об'єктом. Припустимо, що перехідний процес є коливальним (рис. 1).




а) б)

Рис. 1. Типові перехідні процеси у системах: а) – астатичній; б) – статичній

Наведені нижче оцінки поширюються і на аперіодичні перехідні процеси. Зазвичай, приймають задане значення регульованої величини $y_p = 0$, де ординати $y_p$ відповідають відхиленню регульованої величини від заданого значення [2]. Після дії збурення, система через деякий час досягає встановленого значення вихідної величини $y_{\text{уст}}$, яке залежить від коефіцієнта підсилення об'єкта та величини збурення. Регулятор зменшує залишкове відхилення, і скорочує проміжок часу, необхідний для досягнення встановленого значення, тобто тривалість перехідного процесу. Статичну точність САР характеризує залишкове відхилення $\delta = y(\infty) = \lim_{t\to\infty} y(t)$означивши у найбільш загальній структурній схемі САР передавальні функції об'єкта й автоматичного регулятора через $W_o(p)$ і $W_1(p)$, отримаємо передавальні функції системи по окремих каналах. Так, передатні функції, що пов'язують відхилення регульованої величини $\delta$ (похибку) зі збуренням $f$, мають вигляд:

$$W_\delta(p) = \frac{\delta(p)}{f(p)} = \frac{1}{1+W_0(p)W_p(p)} = \frac{1}{1+W(p)},$$

де $W(p) = W_0(p)$, $W_p(p)$ – передатна функція розімкнутої системи.

Перерегулювання визначається як відносне максимальне відхилення регульованої величини $y_{p\_max}$ від її усталеного значення $y(\infty)$ у відсотках $\delta = 100\%\ y_{p\_max} - y(\infty)$. При аперіодичному процесі, $\delta = 0$, при коливальному незатухаючому (з постійною амплітудою) $\delta = 100\%$, і при коливальному розбіжному $\delta > 100\%$. Для стійкої САР $0 \le \delta \le 100\%$, при цьому чим більшим є $\delta$ , тим більшим є коливальність і тривалість перехідного процесу.

Швидкодія САР характеризує час регулювання $t_p$, тобто тривалість перехідного процесу від моменту прикладення збурення до моменту, коли відхилення $y_p$ по відношенню до нового усталеного значення не перевищує заданного постійного малого значення $\Delta$ (наприклад, $\Delta$= 5%). Таким чином, $t_p$ – це час наближення до усталеного значення з заданою точністю $\Delta$ – $[y(tp) - y(\infty)]/y(\infty) \le \Delta$.

Коливальність процесу (оцінка для коливальних перехідних процесів) характеризується не тільки значенням перерегулювання, але й іншими показниками: частотою затухання коливань, їх кількістю за час $t_p$. Для непрямої оцінки якісних характеристик системи у динамічному режимі використовується ряд методів, одним з яких, є оцінка якості регулювання по дійсній частотній характеристиці (ДЧХ) [3].

Розглянемо знаходження ДЧХ замкнутої системи, і оцінки за її допомогою якості перехідного процесу. Комплексні коефіцієнти підсилення замкнутої $K(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$ і розімкнутої $W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ систем пов'язані співвідношенням

$$K(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)} = \frac{W(\omega)e^{j\phi}}{1 + W(\omega)e^{j\phi}} = P(\omega) + jQ(\omega).$$

Виділяючи у правій частині дійсну частину, отримуємо вираз для побудови дійсної частотної характеристики (ДЧХ) замкнутої системи:

$$P(\omega) = \frac{U(\omega)[1+U(\omega)\cos\phi(\omega)]}{[1+U(\omega)]^2+V^2(\omega)};\ P(\omega) = \frac{W^2(\omega)+W(\omega)\cos\phi(\omega)}{W^2(\omega)+2W(\omega)\cos\phi(\omega)+1}.$$

За одним з наведених рівнянь можна побудувати ДЧХ, яка у подальшому може бути використаня для оцінки за її допомогою якості перехідного процесу. Оцінка якості перехідного процесу за допомогою ДЧХ ґрунтується на використанні однозначного зв'язку між перехідним процесом і дійсною частотною характеристикою. Математично цей зв'язок виражається формулою $y(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{P(\omega)}{\omega} sin(\omega t)d\omega$. Використовуючи дане співвідношення, можна опосередковано оцінити границі перехідного процесу за амплітудою і тривалістю, вказати його початкові і кінцеві значення, оцінити перерегулювання. Така якісна оцінка може бути здійснена за наступними правилами [4]:

1. Якщо ДЧХ $P(\omega)$ обмежена за модулем в усьому діапазоні дійсних частот $\omega$, то крива перехідного процесу також обмежена за модулем. При цьому справджується нерівність $|P(\omega)| < M$, та $|y(t)| < M$.

2. Якщо при деякій частоті $\omega$ відбувається необмежене зростання $P(\omega)$, $(P(\omega) \to \infty)$ , то відповідний перехідний процес буде мати характер незатухаючих гармонічних коливань. Чим більшим є пік ДЧХ, тим більш коливальним є перехідний процес (ПП) у системі.

3. Якщо ДЧХ $P(\omega)$ може бути подана у вигляді суми окремих характеристик $P(\omega) = \sum_{i=1}^{n} P_i(\omega)$, то ПП може бути отриманий як сума окремих ПП $y_i(t)$: $y(t) = \sum_{i=1}^{n} y_i(t)$.

4. Якщо дійсні частотні характеристики пов'язані співвідношенням $P_1(\omega) = kP_2(\omega)$, то відповідні перехідні процеси визначаються співвідношенням $y_1(t) = ky_2(t)$.

5. Перетворенню ДЧХ $P(\omega)$ вздовж осі частот $\omega$ вираженому формулою $P_1(n\omega) = P_2(\omega)$, відповідає перетворення перехідних процесів $y_1(t/n) = y_2(t)$. Іншими словами, чим плавніше проходить частотна характеристика, тим скоріше затухає перехідний процес.

6. Граничне значення перехідної функції дорівнює значенню $P(\omega)$ при нульовій частоті $\lim_{t\to\infty} y(t) = P(0)$.

7. Початкове значення перехідної функції дорівнює граничному значенню ДЧХ $\lim_{t\to 0} y(t) = lim\, P\,(\omega)$.

8. Якщо $P(\omega)$ є додатною незростаючою функцією частоти, тобто $P(\omega) > 0$, $0 < \omega < \omega_{\text{ср}}$, і $dP(\omega)/d(\omega) \leq 0$, то перерегулювання не перевищує 18% усталеного значення $y(t)$.

9. Якщо $P(\omega)$ в інтервалі дійсних частот $0 < \omega < \omega_{\text{ср}}$ зберігає додатній знак, де $\omega_{\text{ср}}$ – частота, при якій $P(\omega_{\text{ср}}) = 0$, то час, що відповідає цій характеристиці перехідного процесу, $t_p > \pi/\omega_{\text{ср}}$.

10. У випадку незростаючої неперервної функції $P(\omega)$, яку можна апроксимувати трапецією з нижньою основою $\omega_{\text{ср}}$, час відповідного перехідного процесу буде знаходитись у межах $\pi/\omega_{\text{ср}} < t_p < 4\pi/\omega_{\text{ср}}$.

Для реалізації оцінки якості регулювання по дійсній частотній характеристиці (ДЧХ), побудувати $P(\omega)$ для замкнутої САР, і використовуючи оцінки 1–10 оцінити якість регулювання. Верифікація результатів аналітичних обчислень, та оцінка якості перехідних процесів за допомогою ДЧХ, реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink. Створені Simulink-моделі дозволяють: досліджувати перехідні процеси; аналізувати стійкість системи; оцінювати вплив навантаження та збурень; налаштовувати регулятори; перевіряти працездатність алгоритмів керування до впровадження на реальному обладнанні.

**Висновки.** Розглянуто можливості застосування апарату передатних функцій для математичного опису систем керування. Визначено підходи до кількісної оцінки якості перехідних процесів. Обґрунтовано доцільність використання сучасних програмних засобів, зокрема Matlab-Simulink для моделювання та аналізу режимів роботи електродвигунів на транспорті, оскільки Simulink забезпечує достатньо точне відтворення динаміки електромеханічних систем. Результати моделювання можуть відображатися у вигляді графіків, часових діаграм, осцилограм, таблиць параметрів, що дозволяє отримувати результати, близькі до реальних умов експлуатації.

## Список використаних джерел


1. Boussalem, A., & Boucher, M. (2023). *"Performance indices for linear and nonlinear control systems: A comparative review" – ISA Transactions*, 135, 204–220. DOI: 10.1016/j.isatra.2023.03.015
2. Zhang, Y., Li, X., & Ortega, R. (2023). *"Direct quantitative evaluation of PID control performance in industrial processes" – Journal of Process Control*, 125, 1–15. DOI: 10.1016/j.jprocont.2023.04.008
3. Kochetova, T., Petrov, D., & Smirnov, A. (2024). *"Adaptive metrics for performance evaluation of control systems under parametric uncertainty" – Control Engineering Practice*, 138, 104–119. DOI: 10.1016/j.conengprac.2024.02.007
4. Singh, R., Kumar, P., & Wang, S. (2025). "Time and frequency domain indices for assessing control system performance" – IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72(5), 4521–4534. DOI: 10.1109/TIE.2025.3145678

# МОДЕЛЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ ЗА ВІДЕО ЗОБРАЖЕННЯМ

**Konrad Krol[1], Бройде Ю.[2], Ткаченко В.[3], Підгорний М.[3]**
[1]CFF GmbH & Co. KG, Ilmenau, Germany
[2] RowerUp, Київ, Україна
[3] Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Сучасні інформаційні технології (ІТ) докорінно змінили підходи до розпізнавання, аналізу та оптимізації фізичних вправ у спорті й фізичному вихованні. Вони дозволяють не лише автоматизувати процеси збору й обробки даних, а й здійснювати глибокий аналіз рухів, контролювати стан здоров'я та підвищувати ефективність тренувального процесу. Запропонована авторами модель рухомого апарату спортсмена (Модель J13Pose) 13-суглобова модель, описує позу спортсмена в просторі та в кадрі, та подана як система взаємозв'язаних біокінематичних ланок.

**Ключові слова:** модель пози людини, біомеханіка, розпізнавання фізичних вправ, 13-суглобова модель.

# A MODEL FOR RECOGNITION AND ANALYSIS OF PHYSICAL EXERCISES BASED ON VIDEO IMAGES

**Konrad Krol[1], Broide Y.[2], Tkachenko V.[3], Pidhorny M.[3]**
[1]CFF GmbH & Co. KG, Ilmenau, Germany
[2] RowerUp, Kyiv, Ukraine
[3] Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** Modern information technologies (IT) have radically transformed approaches to the recognition, analysis, and optimization of physical exercises in sports and physical education. They enable not only the automation of data collection and processing but also the in-depth analysis of movements, monitoring of health status, and enhancement of training effectiveness. The model of an athlete's musculoskeletal system proposed by the authors (the J13Pose Model), a 13-joint model, describes the athlete's posture in space and within a frame, and is presented as a system of interconnected biokinematic links.

**Keywords:** human posture model, biomechanics, exercise recognition, 13-joint model.

**Вступ.** Сучасні технології відкривають нові можливості для покращення тренувань, підвищення ефективності змагань та збереження здоров'я спортсменів. Від трекерів до віртуальної реальності, від систем штучного інтелекту до аналізу великих об'ємів даних - ці технології несуть значний внесок у розвиток сучасного спорту [1,2].

Способом моделювання рухового апарату спортсмена є уявлення про нього як про систему взаємозв'язаних біокінематичних ланок. В умовах реального функціонування організму людини всі рухомі ланки тіла містять між собою кінематичні зв'язки, які обмежують їх зовнішню свободу рухів. Завдяки цим зв'язкам усі біокінематичні ланки об'єднані у біокінематичні пари [2].

**Мета роботи.** Розробити модель пози людини як базовий елемент в алгоритмах розпізнавання та аналізу фізичних вправ (Модель J13Pose).

**Постановка задачі.** В біомеханіці, вимірювання механічних характеристик руху (швидкість, прискорення, траєкторія) здійснюється за допомогою спеціальних комп'ютерних програм та відеоаналізу. Сучасні системи часто ґрунтується на реєстрації сигналів від рефлексивних маркерів розміщених на тілі спортсмена, використовують оптико-електронні датчики, відеокамери, тензоплатформи й електроміографи для збору та синхронізації даних про рухи спортсмена. Автоматизована система апаратно-програмного комплексу експрес-аналізу біомеханічних характеристик розпізнає траєкторію руху спортсмена. Обробка результатів дослідження відбувається з використанням комп'ютерних програм, що дозволяє визначати кінематичні та динамічні характеристики рухів, оцінювати поставу та рівновагу.

Позу спортсмена можна описати та змоделювати різними способами. Залежно від того, яка інформація доступна, а також від того, які операції планується виконувати з позами, повинна бути розроблена найбільш зручна базова модель. Виникає необхідність представлення моделі та основні операції з нею, які будуть розроблені для використання при вирішенні підзадач задачі розпізнавання та аналізу фізичних вправ.

**Вирішення проблеми.** Досвід, отриманий у процесі розробки технології розпізнавання та аналізу фізичних вправ, показав, що в одному й тому ж алгоритмі може використовуватися кілька похідних моделей пози, залежно від того, яке з цих уявлень є зручним на даному етапі алгоритму. Похідні моделі можуть бути еквівалентними базовій, а можуть містити менше інформації. Оскільки галузь розпізнавання поз спортсменів розвивається швидко, у процесі написання даного дослідження використовується базова модель. Це пов'язано з тим, що сьогодні доступні нейронні мережі, які під час аналізу зображення надають 13 суглобових поз спортсмена. Модель створена та представлялися у вигляді програмного коду мовою Python. Для запису цієї моделі, а також для її збереження в пам'яті комп'ютера було обрано нотацію -JSON.

Авторами дослідження створена (Модель J13Pose) 13-суглобова модель, яка описує позу спортсмена в просторі та в кадрі. Складається з декількох підмоделей, кожну з яких можна включити за бажанням: 3-вимірне 13-суглобове зображення пози в просторі (підмодель №1); 2-вимірне 13-суглобове зображення пози в кадрі або на іншій площині (підмодель №2); 2-вимірне 13-суглобове зображення пози, що вказує прапорцями, чи знаходиться суглоб у кадрі (підмодель №3); 2-вимірне 13-суглобове зображення пози, що вказує якість видимості суглоба у кадрі (підмодель №4); 2-вимірний контур пози у кадрі (підмодель №5); 2-вимірну теплову карту пози в кадрі (підмодель №6). Також з перших двох підмоделей автоматично виводяться ще 3 підмоделі (вони не зберігаються в пам'яті при збереженні моделі): 3-вимірне 15-суглобове представлення пози в просторі з автоматично розрахованими центральними точками; 2-вимірне 15-суглобове представлення пози в кадрі або в просторі з автоматично розрахованими центральними точками; 3-вимірне 15-суглобове представлення пози в просторі, задане 3-вимірними кутами суглобів і довжинами кісток. Назви суглобів, з яких складаються 13 суглобових підмоделей: l_ankle - ліва щиколотка; r_ankle - права щиколотка; l_knee - ліве коліно; r_knee - праве коліно; l_hip- лівей стегно; r_hip - праве стегно; l_wrist - лівий зап'ясток; r_wrist - правий зап'ясток; l_elbow - лівий лікоть; r_elbow - правий лікоть; l_shoulder - ліве плече; r_shoulder - праве плече; head – голова.

В дослідженні авторами описана одна з підмоделей, а саме 2-вимірне 13-суглобове зображення пози в кадрі або на іншій площині (рис. 1).

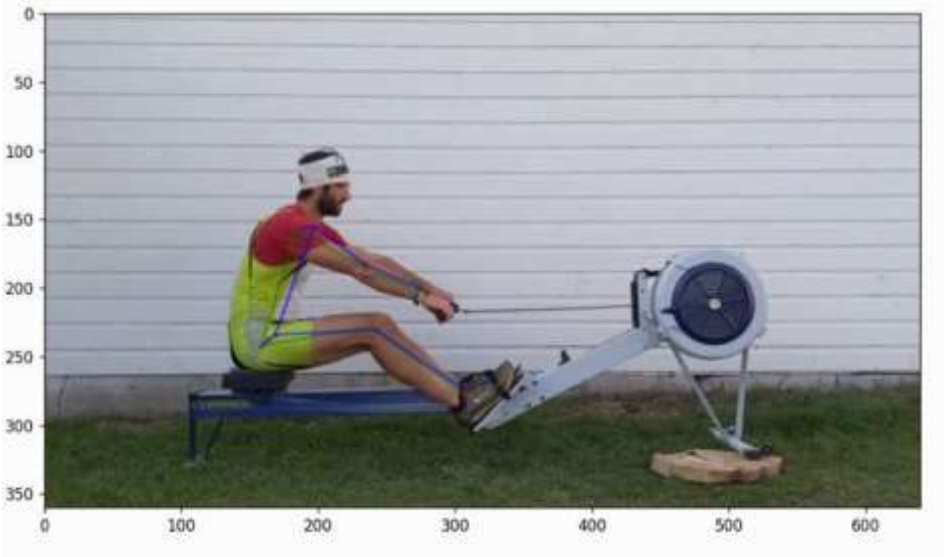



Рис. 1. Приклад моделі J13Pose, в якій задано лише двовимірне представлення пози в просторі

У двовимірному зображенні пози для кожного суглоба вказується його положення, яке подане двома числами. Перше число — координата суглоба по осі x. Друге число — координата суглоба по осі y, спрямованій вниз. За умови, якщо 2-вимірне представлення згенеровано нейронною мережею на основі аналізу кадру – то розмірність чисел пікселі. У разі, якщо 2-вимірне представлення згенеровано як проекція від тривимірного – розмірність чисел метри. У разі, якщо розмірність чисел – пікселі, то опціонально ще вказується розмір фрейму.

Описову схему моделі J13Pose, в якій задано лише двовимірне представлення пози в просторі (рис. 1) подано нотацією JSON:


```
{
      "schema":"J13Pose",
      "joints_coords_2d":{
        "r_ankle":[270.4216613769531, 453.0145568847656],
        "l_ankle":[252.16519165039062, 453.4826965332031],
        "r_knee":[267.8298034667969, 420.4659423828125],
        "l_knee":[252.77899169921875, 421.5731506347656],
        "r_hip":[262.7959899902344, 390.82373046875],
        "l_hip":[248.41183471679688, 389.6375427246094],
        "r_wrist":[300.918212890625, 381.17987060546875],
        "l_wrist":[234.26112365722656, 356.06231689453125],
        "r_elbow":[284.7786560058594, 367.741455078125],
        "l_elbow":[233.59922790527344, 353.704345703125],
        "r_shoulder":[269.5454406738281, 350.2191467285156],
        "l_shoulder":[245.8131561279297, 346.2144470214844],
        "head":[260.0567321777344, 331.22900390625]},
        "origin":{"classifier":"Pose2D_v1","classifier_model":"ResNet50"},
        "frame_size_wh":[640,480]
}
```


**Висновки.** Розроблена модель рухового апарату спортсмена (Модель J13Pose) 13-суглобова модель, яка описує позу спортсмена в просторі та в кадрі, що подана як система взаємозв’язаних біокінематичних ланок. Застосування поданої моделі дозволить змінити підходи до розпізнавання, аналізу та оптимізації фізичних вправ у спорті й фізичному вихованні.

Подальший розвиток передбачає розширення множини підмоделей рухового апарату спортсмена.

## Список використаних джерел


1. Науково-методичні основи використання інформаційних технологій в галузі фізичної культури і спорту: збірник наукових праць, Харків : ХДАФК, 2023. Випуск 7. 163 с. URL: http://visnyk-ekon.uzhnu.edu.ua/index.php/wissn009.
2. Бройде, Ю. І., Підгорний, М. В., Литовченко, В. В., & Підгорна, І. М. (2026). Сучасні моделі та методи розпізнавання фізичних вправ людини. Управління розвитком складних систем, (65), 107–116. URL:https://doi.org/10.32347/2412-9933.2026.65.107-116.

# ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ ПІДКРІПЛЕНИХ ОБОЛОНОК

**Майбородіна Н.В.[1], Герасименко В.П.[1], Мейш Ю.А.[2]**
[1]ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, Україна
[2]Національний університет біоресурсів та природокористування України, Київ, Україна

**Анотація**. У матеріалах роботи наведено результати застосування інформаційних технологій для моделювання напруженого стану багатошарових підкріплених оболонок різної геометричної конфігурації та з різними фізико-механічними характеристиками матеріалів. Це дозволило визначити розподіл напружень у конструкціях під дією зовнішніх навантажень. Метою наукової роботи є дослідження особливостей використання сучасних інформаційних технологій і програмних засобів для математичного моделювання багатошарових підкріплених оболонок та визначення їх основних напружено-деформованих характеристик. Основним завданням роботи є розробка адекватної математичної моделі, використання якої забезпечує високоточний розрахунок напруженого стану таких конструкцій. Об'єктом дослідження є процес моделювання напруженого стану багатошарових підкріплених оболонок; предметом дослідження – математичні моделі та інформаційні технології для реалізації моделювання. У роботі проведено оцінювання напружень багатошарових підкріплених оболонок для різних часових інтервалів та в різних просторових координатах, а також досліджено вплив конструктивних параметрів і властивостей матеріалів на напружений стан оболонок.
**Ключові слова:** багатошарова оболонка, напружений стан, математична модель, інформаційні технології, підкріплені конструкції.

# APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MODELING THE STRESS STATE OF MULTILAYER REINFORCED SHELLS

**Maiborodina N.V.[1], Gerasymenko V.P.[1], Meish Yu.[2]**
[1]Separated Subdivision of NULES of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute", Nizhyn, Ukraine
[2]The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper presents the results of applying information technologies for modeling the stress state of multilayer reinforced shells of various geometric configurations and with different physical and mechanical properties of materials. This made it possible to determine the stress distribution in structures under external loads. The aim of the study is to investigate the features of using modern information technologies and software tools for mathematical modeling of multilayer reinforced shells and to determine their main stress-strain characteristics. The main objective of the work is to develop an adequate mathematical model, the use of which ensures high-precision calculation of the stress state of such structures. The object of the study is the process of modeling the stress state of multilayer reinforced shells; the subject of the study is mathematical models and information technologies for implementing the modeling process. The paper evaluates stresses in multilayer reinforced shells for different time intervals and spatial coordinates, and also investigates the influence of structural parameters and material properties on the stress state of the shells.
**Keywords**: multilayer shell, stress state, mathematical model, information technologies, reinforced structures.

**Вступ**. Математичне моделювання напруженого стану багатошарових підкріплених оболонок із використанням сучасних інформаційних технологій є актуальним завданням у зв'язку з широким застосуванням таких конструкцій у машинобудуванні, будівництві, авіаційній та енергетичній галузях. У процесі експлуатації оболонки та оболонкові конструкції зазнають впливу різноманітних динамічних навантажень. У зв'язку з цим виникає необхідність у детальному дослідженні їхньої стійкості та динамічних характеристик окремих елементів, так і всієї конструкції загалом. Вивчення властивостей напруженого стану багатошарових конструкцій, отримане в результаті математичного моделювання, дозволяє ефективно проєктувати, удосконалювати та оптимізувати інженерні системи з урахуванням вимог міцності, надійності та довговічності.

**Мета роботи.** Метою наукової роботи є дослідження особливостей використання сучасних інформаційних технологій і програмних засобів для математичного моделювання багатошарових підкріплених оболонок та визначення їх основних напружено-деформованих характеристик із врахуванням дискретного розміщення ребер.

**Постановка задачі.** Відомо, що напружено-деформований стан багатошарових підкріплених оболонок залежить від їх геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей матеріалів шарів [1, 2], а також характеру та розміщення підкріплюючих елементів [3]. Особливої складності задача набуває у випадку врахування дискретного розташування ребер та дії на конструкцію нестаціонарних навантажень [3].

З огляду на це виникає потреба у розробці математичної моделі, яка б адекватно описувала напружено-деформований стан багатошарових підкріплених оболонок з урахуванням дискретного розміщення ребер і дозволяла проводити аналіз їх поведінки під дією змінних у часі навантажень. При цьому важливо забезпечити можливість використання сучасних інформаційних технологій і програмних засобів для автоматизації розрахунків та підвищення їх точності. Таким чином, задача дослідження полягає у побудові математичної моделі коливань багатошарової підкріпленої оболонки з врахуванням дискретного розміщення ребер, у розробці та реалізації чисельного методу її розв'язання з метою визначення напружено-деформованого стану конструкції в різних умовах навантаження.

**Вирішення проблеми.** Дискретно підкріплена багатошарова еліпсоїдальна оболонка розглядалася як пружна конструкція, що складалася з обшивки та системи підкріплюючих ребер. Напружено-деформований стан конструкції описано у межах геометрично нелінійної теорії пружних оболонок і стержнів типу С. П. Тимошенка.

Деформований стан гладкої багатошарової оболонки визначався компонентами узагальненого вектора переміщень точок серединної поверхні. Деформації *i*-го підкріплюючого ребра, орієнтованого вздовж осі $\alpha_1$, задавалися через узагальнений вектор переміщень центрів ваги поперечних перерізів ребра. В роботі використано жорстке з'єднання оболонки з підкріплюючими елементами вздовж ліній контакту.

Для побудови рівнянь коливань дискретно підкріпленої еліпсоїдальної багатошарової оболонки використано варіаційний принцип Гамільтона–Остроградського.

У результаті варіювання та подальшого інтегрування, із урахуванням напружень для оболонки і підкріплюючих елементів, а також умов їх з'єднання, отримано систему рівнянь:

- рівняння коливань гладкої частини оболонки;
- рівняння коливань підкріплюючих ребер, орієнтованих уздовж координатної осі $\alpha_1$;

Отриману систему рівнянь доповнено відповідними початковими та граничними умовами, які випливали із варіаційного принципу та забезпечили повний опис динамічної поведінки підкріпленої багатошарової оболонки.

Система диференціальних рівнянь у частинних похідних мала просторові розриви по координаті $\alpha_1$. Ці розриви виникали у місцях, де лінії центрів ваги поперечних перерізів ребер проєктувалися на серединну поверхню багатошарової оболонки. З огляду на наявність розривів, чисельний алгоритм передбачав роздільний пошук розв'язків: окремо для гладких ділянок оболонки та окремо для підкріплювальних елементів. Для отримання розв'язків системи використовувалися інтегро-інтерполяційний метод для побудови скінченно-різницевих схем по просторовим координатам та явна скінченно-різницева схеми типу "хрест" по часовій координаті. Такий підхід забезпечив ефективність розрахунку динамічних процесів для підкріпленої багатошарової еліпсоїдальної оболонки із врахуванням дискретного розміщення підкріплюючих ребер. Перехід від неперервної математичної моделі до її скінченно-різницевого аналога відбувався у два кроки: чисельне представлення основних рівнянь коливань, записаних через зусилля та моменти та дискретизація значень зусиль-моментів та відповідних їм деформацій.

В якості прикладу в роботі розглянуто дискретно підкріплену тришарову еліпсоїдальну оболонку з жорстко затисненими краями при дії розподіленого нормального навантаження.

Геометричні та фізико-механічні параметри тришарової оболонки:

$$\alpha_{10}=\frac{\pi}{12};\quad \alpha_{1N}=\pi-\frac{\pi}{12};\quad \alpha_{20}=-\frac{\pi}{2};\quad \alpha_{2N}=\frac{\pi}{2};\quad \frac{a}{h}=30;\quad h=h_1+h_2+h_3;\quad h_1=h_3=10^{-2};$$

$$h_2=3\cdot10^{-2};\quad E_1^1=7\cdot10^{10};\quad E_2^1=E_1^1;\quad E_1^2=\frac{E_1^1}{1000};\quad E_2^2=E_1^2;$$

$$\nu_{12}^1=\nu_{21}^1=\nu_{12}^2=\nu_{21}^2=\nu_{12}^3=\nu_{21}^3=0,33;\quad \rho_1=\rho_3=2,7\cdot10^3\,кг/м^3;\quad \rho_2=3\cdot10^2\,кг/м^3.$$

На рис. 1 зображено залежність величини напруження $\sigma_{11}$ від часу $t$ в точці $\alpha_1=\frac{\pi}{2}, \alpha_1=\frac{\pi}{8}$ на часовому інтервалі $t=100T$. Крива з індексом 1 відповідає випадку гладкої тришарової еліпсоїдальної оболонки. Крива з індексом 2 відповідає випадку підкріпленої тришарової еліпсоїдальної оболонки. Максимальне абсолютне значення величини $\sigma_{11}$ для випадку гладкої тришарової оболонки $\sigma_{11}=4,08\cdot10^7\,Pa$ спостерігалося в момент часу $t=30T$ (рис. 1), а для випадку підкріпленої тришарової оболонки – $\sigma_{11}=2,75\cdot10^7\,Pa$ в момент часу $t=5T$ (рис. 1). Отже, максимальне напруження $\sigma_{11}$ для випадку гладкої тришарової оболонки в 1,5 рази більше від максимального напруження для випадку підкріпленої еліпсоїдальної оболонки.

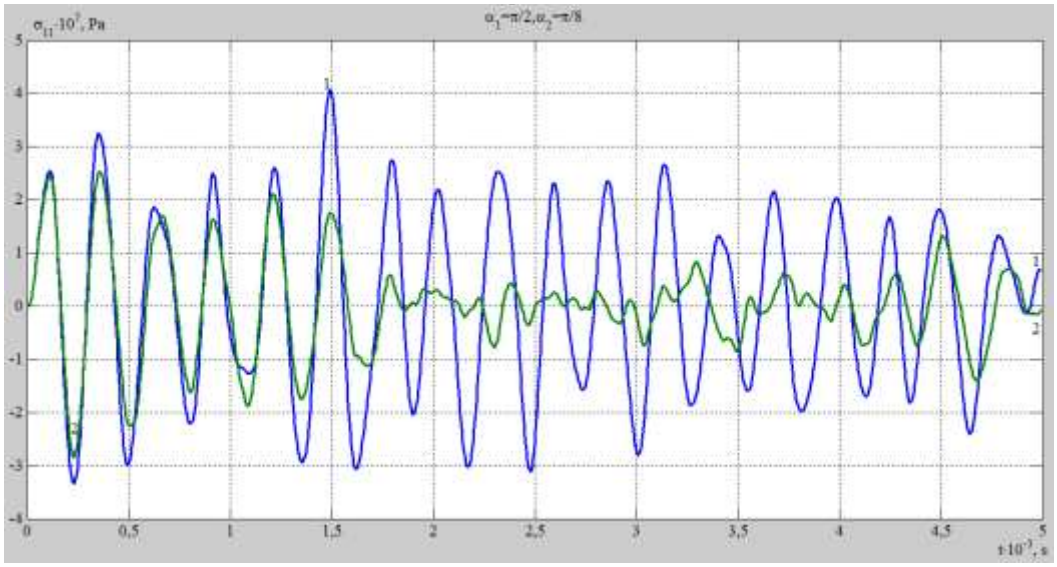



Рис. 1. Залежність величини напруження $\sigma_{11}$ від часу $t$ в точці $\alpha_1=\frac{\pi}{2}, \alpha_1=\frac{\pi}{8}$

**Висновок**. Розглянуто задачі динамічної поведінки багатошарових підкріплених еліпсоїдальних оболонок при дії на них нестаціонарного навантаження. Отримано рівняння коливань оболонок з відповідними граничними та початковими умовами. Для розв'язання поставлених задач побудовано чисельний алгоритм, заснований на скінчено-різницевій апроксимації вихідних рівнянь по просторовим та часовій координатам. Проведено порівняльний аналіз напружень для випадків гладкої та підкріпленої тришарової еліпсоїдальної оболонки.

## Список використаних джерел


1. Le-Phuong B., Chau-Dinh T. (2026). Static and free vibration analyses of multilayer FG GPLRC open shells using a TSDT-type CS-MITC3+ flat shell element. *Composite Structures*, 386, art. no. 120279. doi: 10.1016/j.compstruct.2026.120279
2. Li F., Xie J., Shi P. (2026). Multilayer homogeneous model for functionally graded piezoelectric structure with arbitrary property: From mechanical analysis to optimization *Composite Structures*, 384, art. no. 120173. doi: 10.1016/j.compstruct.2026.120173
3. Meish Yu., Belova M., Maiborodina N., Gerasymenko V. (2024). Determining the effect of longitudinal stiffeners on the deformation of multilayer ellipsoidal shells under non-stationary loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 4(7 (130)), pp. 78-88. doi:10.15587/1729-4061.2024.310241.

# КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЙОВОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ

**Манн Р.[1], Корейба А.[2], Бедрій Д.[3], Семко І.[4], Семко О.[4]**
[1]Akademia Humanitas Humanitas University, Sosnowiec, Poland
[2]Національний транспортний університет, Київ, Україна
[3]Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна
[4]Черкаський державний технологічний університет

**Анотація.** У дослідженні запропоновано та апробовано концептуальну модель ройового управління проєктами як альтернативу традиційним ієрархічним підходам до координації діяльності. Теоретичну основу моделі становить інтеграція положень синергетики, системного мислення та теорії складних адаптивних систем у контексті управління командами. Емпіричне дослідження здійснено на основі агентного моделювання із використанням середовища NetLogo 7.0.2, у межах якого досліджено три режими координації: ройовий, ієрархічний та хаотично-автономний. Результати моделювання засвідчили, що для складних проєктних систем найбільш ефективним є режим структурованої децентралізації, який забезпечує оптимальний баланс між рівнем контролю та автономією учасників і сприяє підвищенню узгодженості та результативності командної роботи.

**Ключові слова**: управління проєктами, ройове управління, синергетика, системне мислення, агентне моделювання, NetLogo.

# CONCEPTUAL MODEL OF SWARM PROJECT MANAGEMENT

**Mann R.[1], Koreiba A.[2], Bedrii D.[3], Semko I.[4], Semko O.[4]**
[1]Humanitas University, Sosnowiec, Poland
[2]National Transport University, Kyiv, Ukraine
[3]Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
[4]Cherkasy State Technological University

**Abstract.** This article proposes and tests a conceptual model of swarm-based project management as an alternative to traditional hierarchical approaches to coordinating activities. The theoretical foundation of the model is based on the integration of principles from synergetics, systems thinking and the theory of complex adaptive systems within the context of team management. The empirical study was conducted using agent-based modelling with the NetLogo 7.0.2 environment, within which three coordination modes were investigated: swarm, hierarchical and chaotic-autonomous. The simulation results showed that for complex project systems, the most effective mode is structured decentralisation, which ensures an optimal balance between the level of control and the autonomy of participants and contributes to greater coordination and effectiveness of teamwork.

**Keywords**: project management, swarm management, synergetics, systems thinking, agent modeling, NetLogo.

**Вступ.** У класичному підході управління проєктами тривалий час домінували принципи детального планування, структуризації робіт, контролю виконання та ієрархічного розподілу повноважень, що забезпечувало ефективність у відносно стабільному середовищі з передбачуваними вимогами. Однак сучасні проєкти все частіше реалізуються в умовах високої взаємозалежності процесів, інформаційного перевантаження, суперечливих пріоритетів і постійної зміни вимог, що знижує ефективність традиційних моделей управління. За таких обставин проблеми виникають не лише на рівні виконання завдань, а й у самій системі координації, яка починає генерувати додаткові втрати: надмірна централізація уповільнює прийняття рішень і перевантажує керівника, тоді як відсутність чітких правил автономії призводить до хаосу та неузгодженості дій. Це зумовлює необхідність формування нових управлінських підходів, здатних ефективно поєднати автономність учасників із системною впорядкованістю [1, 2].

**Мета роботи**. Розробити та апробувати концептуальну модель ройового управління проєктами як альтернативу традиційним ієрархічним підходам до координації діяльності.

**Постановка проблеми**. У сучасній теорії та практиці управління проєктами спостерігається зростаюча невідповідність між складністю проєктного середовища та можливостями традиційних ієрархічних підходів до координації [1, 2]. З одного боку, результати досліджень у межах синергетики свідчать, що впорядкованість у складних відкритих системах формується на основі локальних взаємодій і може визначатися обмеженим набором параметрів порядку [2, 3]. З іншого боку, системне мислення доводить, що ефективність функціонування проєктних команд залежить не стільки від індивідуальних дій, скільки від структури зв'язків, інформаційних потоків і зворотних зв'язків, де навіть незначні затримки здатні спричиняти масштабні негативні наслідки [4]. Водночас сучасні підходи до складних адаптивних систем розглядають команди як мережі автономних агентів, однак відсутність чітко визначених координаційних рамок обмежує ефективність такої автономії [5]. Незважаючи на розвиток концепцій синкретичного та адаптивного управління, залишається невирішеною науково-практична проблема формування такої моделі координації, яка б забезпечувала баланс між автономністю учасників і узгодженістю їх дій у складних мультипроєктних середовищах.

**Основна частина**. Концептуальна модель ройового управління проєктами ґрунтується на положенні, що ефективна самоорганізація не є спонтанним явищем, а формується в результаті цілеспрямованого проєктування управлінського середовища [6]. Запропонована модель має трирівневу структуру, де кожен рівень виконує окрему регуляторну функцію: перший формує загальний контекст і визначає параметри функціонування системи, другий регламентує поведінку агентів у процесі їх щоденної взаємодії, а третій забезпечує адаптивність системи шляхом її навчання та трансформації на основі зворотного зв'язку.

Апробацію концептуальної моделі ройового управління проєктами проведено в середовищі NetLogo 7.0.2, де реалізовано агентну модель проєктної команди з обмеженою раціональністю, локальним баченням і здатністю до координації. На системному рівні оцінювалися ключові показники ефективності, зокрема throughput, затримки, рівень переробки, узгодженість, ентропія, частота втручань та створена цінність. Було змодельовано три сценарії координації: ройовий (структурована автономія), ієрархічний (централізоване управління) та хаотично-автономний (висока автономія без узгоджуючої рамки).

Експериментальний дизайн був однаковим для всіх сценаріїв. Варіювалися чотири незалежні змінні: centralisation-level (0.1, 0.5, 0.9), autonomy-level (0.2, 0.6, 0.9), feedback-frequency (2, 5, 10) та environmental-volatility (0.2, 0.5, 0.8). Фіксованими параметрами були team-size = 7, task-arrival-rate = 3, network-density = 0.4 та interdependence-level = 0.6. Це дало 81 комбінацію на сценарій. Кожна комбінація повторювалася 30 разів, тривалість кожного run – 300 ticks. Загалом виконано понад 7 тисяч симуляцій, що забезпечило репрезентативність отриманих результатів.

На основі узагальнення теоретичних положень і розробленої концептуальної моделі було висунуто низку гіпотез. Передбачається, що ройовий режим координації забезпечує вищу пропускну здатність системи та рівень створеної цінності порівняно з ієрархічним і хаотично-автономним підходами (H1). Водночас очікується, що він характеризується нижчими показниками затримок, переробок і системної ентропії (H2). Окремо враховується, що централізація може підвищувати керованість, однак її ефективність залежить від типу координації та витрат на управлінські втручання (H3). Загалом передбачається, що найвищі результати досягаються за умов структурованої децентралізації, а не крайніх значень контролю чи автономії (H4).

Таблиця 1

**Порівняння середніх значень за сценаріями**

| Сценарій | Throughput M (SD) | Delay M (SD) | Rework M (SD) | Entropy M (SD) | Value M (SD) |
|---|---|---|---|---|---|
| Chaos | 1.182 (0.537) | 87.17 (28.11) | 76.82 (27.51) | 0.544 (0.041) | 218.32 (96.73) |
| Hierarchy | 1.823 (0.211) | 54.41 (11.20) | 44.42 (10.90) | 0.552 (0.052) | 341.09 (40.14) |
| Swarm | 2.245 (0.184) | 37.75 (11.33) | 26.64 (9.71) | 0.498 (0.051) | 434.29 (35.59) |

*Примітка.* Наведено середні значення зі стандартними відхиленнями у дужках. Throughput – завершені задачі за tick; Delay – середня затримка задачі в ticks; Rework – частка задач, що потребували переробки; Entropy – індекс ентропії системи (0-1); Value – накопичена створена цінність.

Swarm-сценарій показав найкращі значення за більшістю цільових метрик: throughput = 2.245, avg-delay = 37.75, rework-rate = 26.64, entropy-index = 0.498 та value-delivered = 434.29. Hierarchy-сценарій посів проміжну позицію, а Chaos-сценарій дав найгірший результат майже за всіма показниками. Порівняно з Hierarchy-сценарієм Swarm-підхід дав на 23.2% вищий throughput, на 30.6% нижчий delay та на 27.3% вищу delivered value, що підтверджує H1 та H2.

**Висновки**. Розроблена та емпірично перевірена концептуальна модель ройового управління проєктами може бути використана як альтернатива ієрархічним підходам до координації. Модель показала, що найкращі результати досягаються не через максимальний контроль і не через необмежену автономію, а через структуровану децентралізацію.

Ройовий режим виявився кращим за ієрархічний і хаотично-автономний за ключовими показниками: найвищий throughput, найнижчі delay та rework, найменша entropy та найбільший value delivered.

Таким чином, ройове управління проєктами може розглядатися як валідна модель керованої самоорганізації в проєктних командах.

## Список використаних джерел


1. Данченко О.Б., Корейба А.З. Моделі самоорганізації в проєктних командах. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 1(77). С. 257-264. https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-257-264
2. Данченко О.Б., Корейба А.З. Аналіз синергетичного підходу до управління проєктами. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер.: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами: зб. наук. пр.* 2022. № 2(6). С. 30-34. https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.6
3. Bushuyev, S., & Ivko, A. (2024). Construction of models and application of syncretic innovation project management in the era of artificial intelligence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3(129)), 44–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306436
4. Malik, E. (2025). A systematic review of the global evolution of self-managed organizations through key characteristics and strategies. Discover Psychology, 5, 23. https://doi.org/10.1007/s44202-025-00364-3
5. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Kraivskyi, B., Railian, M., & Litvinov, A. (2024). Methodological support for managing of critical competences in agile transformation projects within a multi-project medical environment. Advanced Information Systems, 8(4), 26-33. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.04
6. Корейба А.З., Данченко О.Б. Ройовий інтелект у проектному управлінні. *Управління проектами у розвитку суспільства. Тема: «Управління проєктами післявоєнної розбудови України»* : тези допов. XXI міжнар. конф. (м. Київ, 24 травня 2024 року). Київ: КНУБА, 2024. С. 142-146

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СОЦІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

**Осауленко І.**
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

**Анотація.** Робота присвячена аналізу інтелектуальних технологій та методів моделювання, спрямованих на підвищення стійкості складних соціотехнічних систем в умовах деструктивних впливів і загроз воєнного часу. Автор розглядає використання мережевих моделей, імітаційного моделювання та концепції цифрових двійників для прогнозування критичних ситуацій і оперативного управління ресурсами. Окрему увагу приділено інтелектуальному моніторингу стану персоналу за допомогою візуально-семантичного аналізу, що дозволяє мінімізувати вплив людського чинника на безпеку системи.

**Ключові слова**: соціотехнічні системи, стійкість систем, моделювання, критична інфраструктура, інтелектуальні технології, цифрові двійники, моніторинг

# INTELLECTUAL TECHNOLOGIES AND MODELING IN THE CONTEXT OF INCREASING THE RESILIENCE OF SOCIOTECHNICAL SYSTEMS

**Osaulenko I.**
Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The work is devoted to the analysis of intelligent technologies and modeling methods aimed at increasing the stability of complex socio-technical systems in conditions of destructive influences and threats of wartime. The author considers the use of network models, simulation modeling and the concept of digital twins for forecasting critical situations and operational resource management. Special attention is paid to intelligent monitoring of the status of personnel using visual-semantic analysis, which allows minimizing the impact of the human factor on system security.

**Keywords**: socio-technical systems, system resilience, modeling, critical infrastructure, intelligent technologies, digital twins, monitoring

**Вступ**. Особливістю соціотехнічних систем є поєднання і тісний зв'язок людської і технологічної складових, що функціонують і розвиваються під впливом науково-технічних, організаційних, соціальних, природних чинників. Часто складні соціотехнічні системи асоціюють з критичною інфрастраструктурою, тобто забезпеченням життєво важливих суспільних потреб. Ефективне управління такими системами є непростим завданням, особливо в умовах викликів воєнного часу. Своєчасне виявлення можливих деструктивних впливів, оцінювання очікуваних наслідків і адекватне реагування потребують постійного удосконалення відповідних моделей та застосування сучасних інтелектуальних засобів.

**Метою роботи є** аналіз і розвиток існуючих підходів до підвищення стійкості соціотехнічних систем на основі інтелектуальних технологій та моделювання в умовах деструктивних впливів середовища.

**Формулювання проблеми**. Аналіз показує фрагментарність існуючих підходів до забезпечення стійкості соціотехнічних систем в умовах деструктивних впливів середовища і побудови відповідних моделей, а також потребу в розвитку концептуальних засад використання інтелектуальних технологій для моніторингу загроз критичній інфраструктурі і реагування на кризові ситуації.

**Вирішення проблеми**. Вибір форми представлення для соціотехнічної системи залежить від мети моделювання. Мережеві та потокові моделі описують процеси передачі і споживання матеріальних ресурсів, інформації та енергії. Також можливе моделювання фінансових потоків, соціальних комунікацій [1]. Пошкодження якогось із вузлів мережі або каналів внаслідок зовнішнього впливу вплине на функціонування системи. Адаптація до

таких сценаріїв передбачається моделлю гнучкої інфраструктури, де ще при проєктуванні закладається здатність швидко перебудовуватись або дублювання ключових компонентів.

Інший важливий напрямок дослідження соціотехнічних систем пов'язаний з розробленням дискретних імітаційних моделей та створенням цифрових двійників. В імітаційній моделі система описується деяким набором станів, кожний із яких визначається певною сукупністю значень параметрів. Переходи між станами відбуваються внаслідок настання тих чи інших подій, що в підсумку характеризує поведінку системи [2]. Відповідні моменти в процесі моделювання нерідко визначаються на основі статистичного розподілу. Разом з тим, в реальних умовах агресивного зовнішнього середовища складно однозначно визначити правила переходу в моделі, тому підключається база експертних знань та дані моніторингу актуальних загроз. Виникає потреба в організації ефективного обміну даними між модельним і реальним середовищами, що важливо при створенні цифрових двійників.

Використання цифрових двійників, зокрема, в енергетиці дозволяє прогнозувати обсяги генерації і споживання, моделювати розподіл навантаження в мережі, передбачати аварійні ситуації і тестувати різні сценарії реагування. Для цього здійснюється постійна синхронізація віртуальної копії енергетичної системи з реальними даними від IoT-пристроїв, сенсорів, SCADA-систем. Поширеною є трирівнева модель цифрового двійника. Фізичний рівень охоплює реальні об'єкти енергомережі (генератори, інвертори, сенсори, пристрої зберігання тощо), основним завданням є збір вимірювальних даних для передачі у цифрову модель. Віртуальний рівень містить середовище симуляції для цифрових копій компонентів і реалізації математичних моделей. Сервісний рівень включає в себе аналітичні модулі, бази даних і реалізує інтелектуальне управління енергомережею, в тому числі оптимізацію режимів роботи і виявлення відмов [3].

На стійкість соціотехнічної системи суттєво впливає людський чинник. Людина часто вразливіша до руйнівних зовнішніх впливів порівняно з технічними компонентами, але від фахового рівня, фізичного та емоційного стану персоналу залежить швидкість відновлення соціотехнічної системи після значних пошкоджень. Візуально-семантичний аналіз дозволяє інтелектуальній системі моніторингу контролювати узгодженість рухів працівника, швидкість і правильність реакції при виникненні небезпеки на основі даних відеопотоку [4].

Загалом на основі інтелектуальних технологій може бути побудована багаторівнева модель моніторингу, яка включатиме стан генеруючих і розподільчих об'єктів, поведінку персоналу і споживачів, погодні умови та інші чинники.

**Висновки**. Інтелектуальні технології та сучасні методи моделювання є важливими засобами підвищення стійкості соціотехнічних систем в умовах зовнішніх загроз. Використання цифрових двійників, мережевих та імітаційних моделей забезпечує ефективний моніторинг, прогнозування критичних ситуацій і оптимізацію управління ресурсами. Водночас врахування людського чинника та застосування інтелектуального моніторингу персоналу сприяють підвищенню безпеки й надійності функціонування систем.

## Список використаних джерел


1. Vert M., Sharpanskykh A. The Resilience of Complex Sociotechnical Systems: A Meta-Review of Conceptualisations. Systems, 2026, 14, 71, 86 p. https://www.mdpi.com/2079-8954/14/1/71.
2. Білоусов М. Ю., Стародубцев М. Г., Шибанов С. В. Використання дискретно-подійного моделювання при розробці цифрових двійників. Інтелектуальні технології цивільної безпеки та робототехнічні системи аварійно-рятувальних робіт : матеріали І-ої Всеукраїнської конференції : тези доповідей [Електронний ресурс]. Харків : ХНУРЕ, 2026. С. 168–172. Режим доступу: https://openarchive.nure.ua/entities/publication/ed49e9ae-2011-429d-a5c0-e30adbd7e7c5.
3. Шиманюк П. В., Сичова В. В., Блінов І. В. Цифрові двійники мікромереж: концепції, архітектура та виклики. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2025. Вип. 72. С. 5–14. https://doi.org/10.15407/publishing2025.72.005.
4. Удовиченко О. Моніторинг дій персоналу на автоматизованих виробничих лініях. Інтелектуальні технології цивільної безпеки та робототехнічні системи аварійно-рятувальних робіт : матеріали І-ої Всеукраїнської конференції : тези доповідей [Електронний ресурс]. Харків : ХНУРЕ, 2026. С. 111–113. Режим доступу: https://openarchive.nure.ua/entities/publication/e7ba82c3-5f59-4fcb-a82c-25d7c076a5.

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО РОЗРІЗНЕННЯ RZ-СИГНАЛІВ НА ФОНІ НЕГАУСОВИХ ЗАВАД

**Палагін В.В., Зорін О.С.**
Черкаський Державний Технологічний Університет, Черкаси, Україна

**Анототація.** У роботі розроблено інформаційну технологію підвищення ефективності розрізнення біполярних дискретних RZ-сигналів у каналах зв'язку з негаусовими завадами. Запропоновано алгоритм цифрової обробки адитивної суміші сигналу та завад, що базується на архітектурі нелінійних розв'язувальних правил з інтеграцією статистичних характеристик вищих порядків, зокрема коефіцієнтів асиметрії та ексцесу. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивну обробку даних, що враховує реальну форму розподілу завад, та суттєво підвищити надійність прийняття рішень в інтелектуальних інформаційних системах. У процесі дослідження обґрунтовано програмно-алгоритмічну реалізацію розв'язувального правила степені S=3, що забезпечило зростання точності обчислювальних алгоритмів та чутливості до специфічних ознак негаусових завад і дозволило мінімізувати ймовірність помилок розв'язувальних правил порівняно з існуючими методами. Водночас встановлено чисельні обмеження на область допустимих значень статистичних параметрів, що є важливим для коректного налаштування програмних модулів при роботі з конкретними класами випадкових процесів. Результати комп'ютерного моделювання підтверджують високу ефективність запропонованої технології та доцільність її впровадження у сучасне програмно-конфігуроване радіо (SDR) та телекомунікаційні системи передачі даних, що функціонують у складних завадових обставинах.

**Ключові слова:** інформаційні технології цифрової обробки сигналів, алгоритми адаптивного розрізнення RZ-сигналів, негаусові завади, статистики вищих порядків.

# INFORMATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE RZ-SIGNAL DISTINCTION IN NON-GAUSSIAN NOISE

**Palahin V.V., Zorin O. S.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper develops an information technology for improving the distinction efficiency of bipolar discrete RZ signals in communication channels with non-Gaussian noise. A digital processing algorithm for an additive mixture of signal and noise is proposed, based on the architecture of nonlinear decision rules that integrate higher-order statistical characteristics, specifically skewness and kurtosis coefficients. This approach enables the implementation of adaptive data processing that accounts for the actual shape of the noise distribution, significantly enhancing decision-making reliability in intelligent information systems. In the course of the study, the software-algorithmic implementation of a decision rule of degree S=3 was justified, which ensured an increase in the accuracy of computational algorithms and sensitivity to specific features of non-Gaussian noise, allowing for the minimization of decision rule error probabilities compared to existing methods. At the same time, numerical constraints on the range of permissible statistical parameter values were established, which is crucial for the correct configuration of software modules when working with specific classes of random processes. The results of computer modeling confirm the high efficiency of the proposed technology and the feasibility of its implementation in modern Software-Defined Radio (SDR) and telecommunication data transmission systems operating in complex interference environments.

**Keywords:** information technologies for digital signal processing, algorithms for adaptive RZ-signal distinction, non-Gaussian noise, Higher-order moments and cumulants, Higher-Order Statistics (HOS).

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій підвищення ефективності обробки біполярних RZ-сигналів є пріоритетним завданням, що безпосередньо впливає на пропускну здатність та надійність цифрових каналів передачі даних. Традиційні алгоритми цифрової обробки сигналів базуються на припущенні про нормальний розподіл завад, що дозволяє спростити програмно-апаратну реалізацію обчислювальних модулів. Проте в реальних комп'ютерних мережах та системах бездротового зв'язку, де діють фактори багатопроменевого поширення, статистичні параметри завад суттєво відхиляються від гаусової моделі.

Більшість існуючих інформаційних технологій аналізу сигналів орієнтовані на використання лише перших двох моментів розподілу, повністю ігноруючи характеристики вищих порядків. Такий підхід спричиняє значну втрату інформації про статистичну структуру негаусової завади, що в умовах цифрової трансформації систем зв'язку призводить до критичного зниження завадостійкості. Це обумовлює необхідність переходу до методів нелінійної обробки даних на основі поліномів вищих степенів [1-4]. На відміну від квадратичних моделей (S=2), підвищення степені полінома до S=3 дозволяє інтегрувати нелінійну природу асиметрії безпосередньо в архітектуру розв'язувального правила алгоритму. Такий підхід забезпечує новий рівень чутливості інформаційної системи до специфічних ознак завад, що дозволяє мінімізувати ймовірність помилки при прийнятті рішень у складних завадових обставинах

**Метою роботи** є підвищення ефективності систем розрізнення сигналів при адитивній взаємодії з негаусовими завадами на основі побудови інформаційної технології реалізації статистик вищих порядків для опису випадкових досліджуваних процесів із формуванням модифікованого моментного критерію якості перевірки статистичних гіпотез та поліноміальних розв'язувальних правил для синтезу ефективних методів і комп'ютерних засобів обробки сигналів.

**Постановка задачі.** Нехай на інтервалі часу (0,T) спостерігаються випадкові сигнали $\xi_i(t),\ i = 0,1,2,$ які являють собою адитивну суміш постійних корисних сигналів різної полярності $\xi_1(t) = a_1 + \eta(t),\ \xi_2(t) = -a_2 + \eta(t),$ та $\xi_0(t) = \eta(t)$ – негаусової завади з нульовим математичним сподіванням та дисперсією $\chi_2$. З сигналів $\xi_i(t)$ формується вектор вибіркових значень $X = \{x_1, x_2, \dots x_n\}$. На основі результатів якого необхідно прийняти рішення про реалізацію однієї з трьох гіпотез:

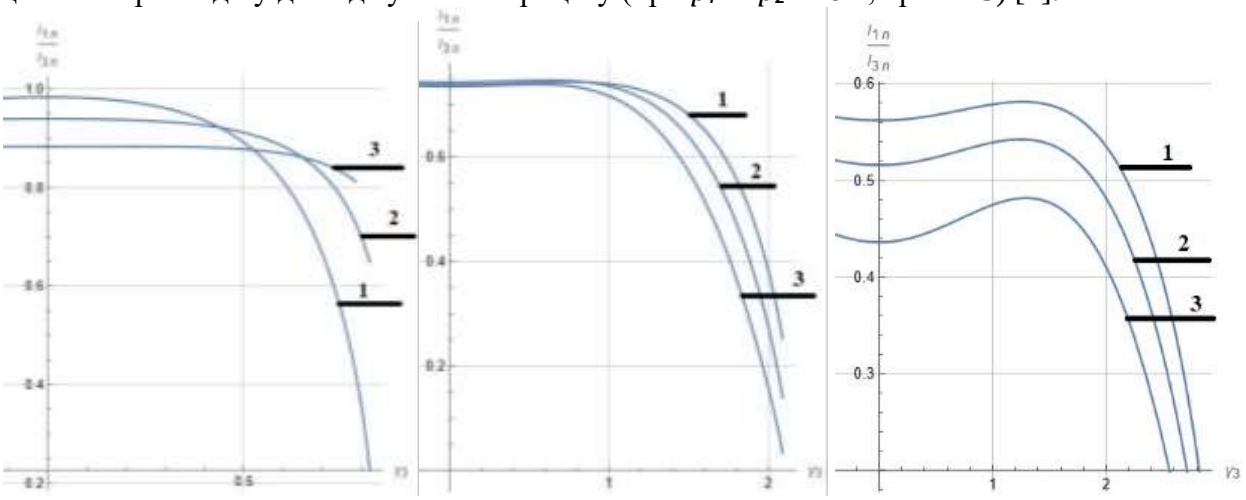
- $H_1$– корисний постійний сигнал $a_1$ присутній, спостерігається адитивна суміш постійного корисного сигналу $a_1$ та $\eta(t)$ – негаусової завади;
- $H_2$ – корисний постійний сигнал $-a_2$ присутній, спостерігається адитивна суміш постійного корисного сигналу $-a_2$ та $\eta(t)$ – негаусової завади;
- $H_0$ - характеризує відсутністю корисних сигналів та наявністю тільки $\eta(t)$ – негаусової завади.

**Вирішення проблеми** базується на застосуванні нових моделей досліджуваних процесів у вигляді статистик вищих порядків, які являють собою послідовність моментів $m_i[\{0, \chi_{i2}, \gamma_{i3}, \dots, \gamma_{il}\}]$, де $\gamma_{i3}, \dots, \gamma_{il}$ – кумулянтні коефіцієнти, які описують ознаки негаусової завади $\eta(t)$. Для обробки вектора вибіркових значень запропоновано використовувати розв'язувальні правила (РП) у вигляді стохастичних поліномів для розрізнення трьох гіпотез, отриманих шляхом розкладання логарифма відношення правдоподібності в ряд, оптимальні коефіцієнти якого знаходяться згідно модифікованого моментного критерію якості перевірки статистичних гіпотез [4].

Встановлено, що при використанні полінома другого степеня (S=2) структура РП залишається квадратичною, де параметри асиметрії $\gamma_3$ та ексцесу $\gamma_4$ негаусової завади залучаються для розрахунку вагових коефіцієнтів РП, але вони використовуються лише для параметричної адаптації симетричної квадратичної форми. Для розширення можливостей обробки сигналів і врахуванні особливостей оброки негаусових завад запропоновано підвищити степінь РП до S=3, що дозволило не тільки використати значення $\gamma_3$ та $\gamma_4$, але і врахувати нелінійну обробку вибіркових значень при вищій степені поліноміального РП. Такий підхід забезпечує адекватне відтворення нелінійних властивостей негаусових завад, що дозволило підвищити ефективність розрізнення біполярних RZ-сигналів.

Для оцінювання ефективності синтезованих поліноміальних РП використано такий показник, як кількість добутої інформації про розрізнення гіпотез $I_{sn}$ $(s = 1,3)$, який є оберненою величиною до модифікованого критерію якості перевірки статистичних гіпотез. Цей показник характеризує суму ймовірностей помилок першого та другого роду поліноміальних РП в залежності від параметрів досліджуваних випадкових процесів, а саме від параметрів коефіцієнта асиметрії $\gamma_3$, ексцесу $\gamma_4$ негаусової завади та відношення сигнал/завада р. На рис.1. наведені порівняльні характеристики отриманих результатів у вигляді залежності $I_{1n}/I_{3n}$ від параметрів завади, які ілюструють підвищення ефективності

запропонованих методів у порівнянні з відомими результатами. Наприклад, на рис.1 (а) значення ймовірності помилок нелінійних РП зменшується приблизно у 1.25 рази при $\gamma_3 = 0.631$ та $\gamma_4 = 0.245$, що відповідає щільності розподілу Релея (при $p_1 = p_2 = 0.1$, крива - 3) у порівнянні з лінійним РП, яке є оптимальним для гаусових моделей завад. На рис.1 (б) це зменшення при S=3 становить близько 1.81 рази, тоді як при S=2 цей показчик становить 1.42 рази при $\gamma_3 = 1.41$ та $\gamma_4 = 4.2$, що відповідає гамма щільності розподілу (при $p_1 = p_2 = 0.1$, крива - 3). На рис.1 (в) зменшення при S=3 становить приблизно у 2.5 рази, тоді як при S=2 забезпечує виграш лише 1.42 рази при $\gamma_3 = 2$ та $\gamma_4 = 6$, що відповідає експоненційній щільності розподілу досліджуваного процесу (при $p_1 = p_2 = 0.1$, крива -3) [4].




а) $\gamma_4 = 0.245$; б) $\gamma_4 = 4.2$; в) $\gamma_4 = 3$;

Рис. 1. Залежність кількості добутої інформації $I_{1n}/I_{3n}$ з вибіркових значень про розрізнення гіпотез від коефіцієнта асиметрії при використанні поліноміальних РП при асиметрично-ексцесній заваді при різних значеннях коефіцієнта ексцесу $\gamma_4$ та відношенні сигнал/завада 1) $p_1 = p_2 = 1$; 2) $p_1 = p_2 = 0.5$; 3) $p_1 = p_2 = 0.1$

**Висновки.** У роботі розроблено інформаційну технологію підвищення ефективності розрізнення біполярних RZ-сигналів, яка базується на реалізації статистик вищих порядків для опису негаусових процесів. Використання запропонованого модифікованого моментного критерію якості та поліноміальних РП третього степеня дозволило, на відміну від відомих підходів, безпосередньо інтегрувати третій момент у функціональну структуру обробки. Це забезпечує адаптацію комп'ютерних засобів до реальної форми щільності розподілу асиметрично-ексцесних завад. Результати моделювання підтвердили суттєве зниження ймовірності помилок: зокрема, для завад з експоненційним розподілом виграш порівняно з лінійними методами сягає 2,5 раза. Водночас встановлено, що підвищення степеня полінома звужує область допустимих статистичних параметрів, що враховується при налаштуванні параметрів розробленої технології. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження таких методів у телекомунікаційні системи для підвищення їхньої завадостійкості.

## Список використаних джерел


1. Палагін, В.В., Зорін, О.С. 2023. Моделі та методи розрізнення RZ-сигналів в інформаційно-вимірювальних системах на фоні асиметричних негаусових завад. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 4 (Серп. 2023), 78–86.
2. Y.Kunchenko: Polynomial Parameter Estimations of Close to Gaussian Random Variables, Aachen: Shaker Verlag, 2002.
3. Mahmoud M. A., Ahmed Nabih Zaki Rashed. Hybrid NRZ/RZ line coding scheme based hybrid FSO/FO dual, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Vol. 22, No. 2, May 2021 p. 866-873.
4. Volodymyr Palahin, Oleksandr Zorin. Models and Methods for RZ-signals distinction in non-Gaussian noise for information-measurement systems. Journal of Electrical Engineering Vol. 75, No. 5, 2024, pp. 372-382.

# ПРОСТОРОВО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОПИТУ НА ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЮ ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ $CO_2$ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС

**Підгорний М.В., Смоляр Р.А.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Розглянуто задачу оптимізації попиту на теплову енергію та скорочення викидів $CO_2$ у системах централізованого теплопостачання міського середовища. Запропоновано просторово-орієнтовану модель, яка на відміну від традиційних підходів враховує мережеві просторові залежності між будівлями через лапласіан графа теплової мережі. Задача сформульована як опукле квадратичне програмування з трикомпонентною цільовою функцією, що включає мінімізацію теплоспоживання, штраф за відхилення від комфортного режиму та просторову регуляризацію. Позитивна напівозначеність лапласіана гарантує єдиний глобальний мінімум. Апробацію проведено на даних мікрорайону Митниця м. Черкаси (110 будівель, 181 доба опалювального сезону). Отримано зниження теплового навантаження на 14,5%, скорочення викидів $CO_2$ на 15,8% та зменшення просторової дисперсії навантаження на 63,1% порівняно з базовим сценарієм.

**Ключові слова:** централізоване теплопостачання, просторова оптимізація, геоінформаційні системи, графовий лапласіан, теплове навантаження, викиди $CO_2$, енергоефективність.

# SPATIALLY ORIENTED MODEL FOR HEAT DEMAND OPTIMIZATION AND $CO_2$ EMISSION REDUCTION USING GIS

**Pidgornyi M.V., Smoliar R.A.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** This paper addresses heat demand optimization and $CO_2$ emission reduction in urban district heating systems. Unlike traditional approaches that treat buildings as independent consumers, the proposed spatially oriented model incorporates network interdependencies through the graph Laplacian of the heat network. The problem is formulated as convex quadratic programming with a three-component objective covering heat consumption minimization, comfort penalty, and spatial regularization. Positive semi-definiteness of the Laplacian guarantees a unique global minimum. Validation on the Mytnytsia district of Cherkasy (110 buildings, 181-day heating season) demonstrated a 14.5% reduction in heat load, 15.8% reduction in $CO_2$ emissions, and 63.1% reduction in spatial load variance compared to the baseline scenario.

**Keywords:** district heating, spatial optimization, geographic information systems, graph Laplacian, heat demand, $CO_2$ emissions, energy efficiency.

**Вступ.** Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є основним джерелом тепла для житлового та комерційного секторів у більшості міст України, Центральної та Східної Європи. За даними IEA, на теплопостачання будівель припадає близько 40% кінцевого енергоспоживання в країнах ЄС, а частка СЦТ у структурі теплового балансу постсовєтських міст перевищує 70% [1]. В умовах кліматичних зобов'язань та викликів для енергетичної інфраструктури підвищення ефективності СЦТ набуває критичної актуальності. Фундаментальною особливістю СЦТ є їх просторово-розподілений характер: теплова мережа з'єднує джерело тепла (ТЕЦ або котельню) з десятками і сотнями будівель через трубопроводи. Теплове навантаження кожного вузла безпосередньо впливає на гідравлічний режим сусідніх вузлів — надмірне споживання в одній частині мережі спричиняє дефіцит тепла в іншій [2]. Проте сучасні методи Urban Building Energy Modeling (UBEM) [3] розглядають будівлі як ізольованих споживачів, що не дозволяє усунути гідравлічний дисбаланс мережі як системи. Інтеграція ГІС у задачі теплопостачання [4] враховує просторову структуру, однак наявні підходи не формалізують мережеві залежності у математичній постановці оптимізації. Теорія сигналів на графах [5] пропонує апарат лапласіана графа для роботи з просторово розподіленими даними на довільних мережах. Застосування цього апарату до задачі оптимізації СЦТ є науково новим: він дає можливість одночасно вирішувати задачу енергозбереження та усунення гідравлічного дисбалансу — двох хронічних проблем міських СЦТ. Мета роботи — розробка та апробація просторово-орієнтованої моделі оптимізації попиту на теплову енергію на основі ГІС та лапласіана

графа, що забезпечує одночасне зменшення теплоспоживання, викидів $CO_2$ та просторової нерівномірності навантаження.

**Постановка задачі.** Розглядається загальна задача оптимізації розподілу теплового навантаження в системі централізованого теплопостачання. Нехай $B = \{1, \dots, n\}$ - множина будівель, підключених до мережі; $T = \{1, \dots, T\}$ - дискретний часовий горизонт із добовим кроком ($T$=181 доба). Змінна рішення $Q_{it} \geq 0$ - теплоспоживання будівлі $i$ у добу $t$ [кВт·год]. Теплопостачальна мережа моделюється зваженим графом $G(B, E, w)$: вершини - будівлі $B$, ребра $E$ - трубопроводи, ваги $w_i^{\chi} = 1/L_i^{\chi}$ - обернено пропорційні до довжини трубопроводу $L_i^{\chi}$.

Базове теплоспоживання будівлі і в добу t визначається лінійною температурною моделлю:

$$Q^{\circ}_{it} = \mu_i \cdot \max(\theta^{nn} - \theta^{put}_t, 0) \cdot 24, \quad (1)$$

де $\mu_i = q^{p}_i{}^{t} \cdot A_i / 1000$ - теплова чутливість будівлі $i$ [кВт/°С], $q^{p}_i{}^{t}$ - питомі тепловтрати огороджувальної конструкції [Вт/(м²·°С)] (залежить від типу і стану утеплення: 0,38-0,52 для радянської панелі, 0,20-0,28 для утеплених новобудов), $A_i$ - опалювана площа [м²], $\theta^{nn} = 20°C$ - нормативна внутрішня температура, $\theta^{put}_t$ - середньодобова зовнішня температура. Параметр $\mu_i$ калібрується за архівом теплолічильників методом МНК. Викиди $CO_2$: $E_{it} = \alpha \cdot Q_{it}$, де

$\alpha = 0{,}20$ кг $CO_2$/кВт·год для Митницької ТЕЦ (природний газ).

Для формалізації просторових залежностей між будівлями будується зважений лапласіан графа:

$$L = D - W, \quad (2)$$

де $W = (w_i^{\chi})^{n \times n}$ - матриця суміжності, $D = diag(\Sigma^{\chi} w_i^{\chi})$ - діагональна матриця степенів. Лапласіан є позитивно напівозначеним ($L \succcurlyeq 0$), що є ключовою теоретичною властивістю: квадратична форма $Q^{kT} L Q^{k} = \Sigma(_i, ^{\chi}) \in E\, w_i^{\chi}(Q_{it} - Q^{\chi}_t)^2$ штрафує різкі перепади навантаження між сусідніми вузлами мережі, що фізично відповідає вимозі гідравлічного балансу трубопроводів. Саме цей член цільової функції дозволяє усунути просторову нерівномірність теплопостачання - проблему, нерозв'язну при незалежній оптимізації будівель.

Задача оптимізації формулюється як мінімізація трикомпонентної цільової функції з вуглецевим бюджетом як обмеженням ($\varepsilon$-метод):

$$\min F(Q) = \Sigma_t \Sigma_i\, Q_{it} + \Sigma_t \Sigma_i\, \beta_i (Q_{it} - Q^{\circ}_{it})^2 + \lambda \Sigma_t\, Q^{kT} L Q^{k}. \quad (3)$$

Три члени функції мають чіткі фізичні інтерпретації. Перший — мінімізація сумарного теплоспоживання — головний критерій економії. Другий — штраф за відхилення від базового режиму $Q^{\circ}_{it}$ - гарантує тепловий комфорт мешканців: коефіцієнт $\beta_i = 1/\sigma^2_i$ визначається з дисперсії $\sigma^2_i$ реального споживання за архівом теплолічильників, будівлі зі стабільним споживанням отримують вищий штраф. Третій - просторова регуляризація через лапласіан (2) - усуває гідравлічний дисбаланс мережі; $\lambda > 0$ - параметр регуляризації. Вуглецевий бюджет $E^{max}$ реалізує метод $\varepsilon$-обмежень: параметр $\alpha \Sigma_i \Sigma_t\, Q_{it} \leq E^{max}$ дозволяє задавати цільовий рівень скорочення $CO_2$, як управлінське рішення.

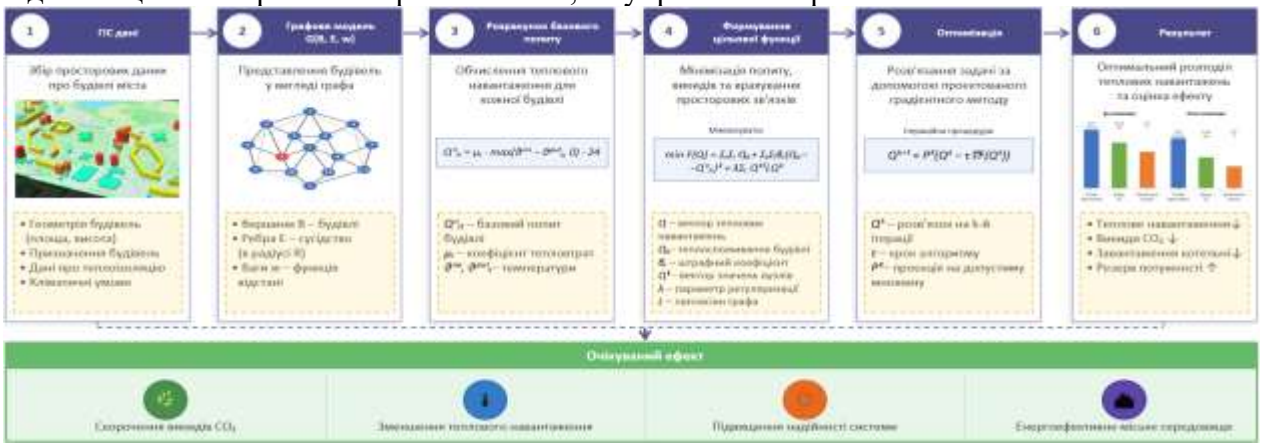



Рис. 1. Архітектура просторово-орієнтованої моделі оптимізації теплового навантаження з використанням ГІС та графових методів

Система обмежень: (I) $Q_{\mathrm{i}}^{\mathrm{men}} \le Q_{\mathrm{it}} \le Q_{\mathrm{i}}^{\mathrm{max}}$ - технічні межі (санітарний мінімум при +18°C і проєктна потужність вводу); (II) $|Q_{\mathrm{it}} - Q^{\circ}{}_{\mathrm{it}}| \le 0{,}2 \cdot Q^{\circ}{}_{\mathrm{it}}$ - допустиме відхилення від базового режиму ±20%; (III) $\Sigma_{\mathrm{i}} Q_{\mathrm{it}} \le U_{\mathrm{s}}{}^{\mathrm{max}}$ - потужність джерела тепла; (IV) пропускна здатність трубопроводів $F_{\mathrm{i}}{}^{\chi \mathrm{max}}$; $(V)\ \alpha \Sigma_{\mathrm{i}} \Sigma_{\mathrm{t}}\, Q_{\mathrm{it}} \le E^{\mathrm{max}}$ - вуглецевий бюджет. Матриця Гессіана $H = 2(B\beta + \lambda L \otimes I^{И}) \succ 0$ - функція $F(Q)$ строго опукла, що гарантує єдиний глобальний мінімум. Задача розв'язується проєктованим градієнтним методом: $Q^{\mathrm{k+1}} = P^{\mathrm{K}}(Q^{\mathrm{k}} - \tau \nabla F(Q^{\mathrm{k}}))$, де $\tau = 1/(2\lambda^{\mathrm{max}}(H))$ - крок, $P^{\mathrm{K}}$ - проєкція на допустиму множину. Критерій зупинки: $\|\Delta Q\|/\|Q\| \le 10^{-6}$ [5]. Загальна схема моделі зображена на рис. 1.

Результати апробації математичної моделі оптимізації попиту на теплову енергію та скорочення викидів $CO_2$ з використанням ГІС на мікрорайоні Митниця наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Результати оптимізації теплового навантаження мікрорайону Митниця**

| Показник | Базовий сценарій S0 | Оптимізований S1 | Зміна |
|---|---|---|---|
| Теплове навантаження, Гкал/год | 121,6 | 104,0 | **−14,5%** |
| Викиди $CO_2$, т $CO_2$/сезон | 23 940 | 20 179 | **−15,8%** |
| Просторова дисперсія навантаження, (кВт·год/добу)² | 847,2 | 312,6 | **−63,1%** |
| Кількість будівель в апробації | 110 | 110 | — |

**Висновки.** У роботі розроблено та апробовано просторово-орієнтовану модель оптимізації попиту на теплову енергію в системах централізованого теплопостачання. Ключовий науковий внесок - формулювання задачі як опуклого квадратичного програмування з лапласіаном графа теплової мережі як регуляризаційним членом, що вперше дозволяє одночасно мінімізувати теплоспоживання та усувати гідравлічний дисбаланс мережі. Позитивна напівозначеність лапласіана ($L \succcurlyeq 0$) гарантує строгу опуклість цільової функції та єдність глобального мінімуму. Апробація на мікрорайоні Митниця м. Черкаси ($n = 110$ будівель, $T = 181$ доба, сезон 2022-2023) підтвердила: зниження теплового навантаження з 121,6 до 104,0 Гкал/год (−14,5%), скорочення викидів $CO_2$ з 23 940 до 20 179 т (−15,8%), зниження просторової дисперсії навантаження на 63,1% - що підтверджує усунення гідравлічного дисбалансу мережі. Аналіз чутливості показує фундаментальний компроміс: без просторової регуляризації ($\lambda = 0$) досягається максимальне скорочення $CO_2$ (18,8%), але просторова дисперсія зростає до 789,4 - що недопустимо з операційної точки зору; оптимальне $\lambda = 0{,}10$ забезпечує баланс між енергоефективністю та гідравлічною рівномірністю. Практичні рекомендації: операторам СЦТ - інтегрувати ГІС-дані трубопроводів з архівами теплолічильників для побудови графа мережі та калібрування моделі; органам місцевого самоврядування - використовувати параметр $E^{\mathrm{max}}$ як інструмент екологічної політики. Результати підтверджують перспективність інтеграції ГІС та методів опуклої оптимізації для підвищення енергоефективності міського середовища.

## Список використаних джерел


1. Kong D., Cheshmehzangi A., Zhang Z., Ardakani S.P., Gu T. Urban building energy modeling (UBEM): a systematic review of challenges and opportunities. Energy Efficiency. 2023;16(6):69. DOI: 10.1007/s12053-023-10147-z
2. Xi H., Zhang Q., Ren Z., Li G., Chen Y. Urban Building Energy Modeling with Parameterized Geometry and Detailed Thermal Zones for Complex Building Types. Buildings. 2023;13(11):2675. DOI: 10.3390/buildings13112675
3. Deng Z., Javanroodi K., Nik V.M., Chen Y. Using urban building energy modeling to quantify the energy performance of residential buildings under climate change. Building Simulation. 2023;16:1629–1643. DOI: 10.1007/s12273-023-1032-2
4. Shuman D.I., Narang S.K., Frossard P., Ortega A., Vandergheynst P. The emerging field of signal processing on graphs. IEEE Signal Processing Magazine. 2013;30(3):83–98. DOI: 10.1109/MSP.2012.2235192

# РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ

**Плахотний О.П., Калейніков Г.Є., Йовченко А.В., Костьян Н.Л.**
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація.** Запропоновано підхід до розробки інформаційно-аналітичної платформи для збору, синхронізації та обробки багатоканальних експериментальних даних у задачах теплового моделювання літій-іонних акумуляторів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності прогнозування температурних режимів у системах терморегулювання акумуляторів за інтенсивних режимів експлуатації (високі C-rate), де спостерігається нерівномірність температурних полів і прискорена деградація. Запропонована архітектура об'єднує гетерогенні джерела даних, зокрема електричні, теплові та механічні параметри, з використанням алгоритмів часової синхронізації. На основі експериментальних даних виконано ідентифікацію внутрішнього опору акумулятора $LiFePO_4$ та оцінку складових теплогенерації. Встановлено, що внесок ентропійного тепла при струмі 1C не перевищує 10%, що дозволяє спрощувати моделі без втрати точності. Наукова новизна полягає у реалізації концепції цифрового двійника, що забезпечує інтеграцію експерименту та моделювання. Отримані результати мають практичне значення для розробки ефективних систем керування акумуляторами.

**Ключові слова:** збір даних, синхронізація гетерогенних даних, внутрішній опір, цифровий двійник.

# DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL PLATFORM FOR DATA COLLECTION AND PROCESSING IN BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS

**Plakhotnyi O., Kaleinikov G., Yovchenko A, Kostian N.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** An approach to developing an information and analytical platform for collecting, synchronizing, and processing multi-channel experimental data in thermal modeling problems of lithium-ion batteries is proposed. The relevance of the study is due to the need to increase the accuracy of predicting temperature regimes in battery thermal control systems under intensive operating conditions (high C-rate), where uneven temperature fields and accelerated degradation are observed. The proposed architecture integrates heterogeneous data sources, including electrical, thermal, and mechanical parameters, using time synchronization algorithms. Based on experimental data, the internal resistance of the $LiFePO_4$ battery was identified and the components of heat generation were estimated. It was found that the contribution of entropic heat at a current of 1C does not exceed 10%, which allows simplifying the models without loss of accuracy. The scientific novelty lies in the implementation of the concept of a digital twin, which provides integration of experiment and modeling. The results obtained have practical significance for the development of effective battery management systems.

**Keywords**: data acquisition, heterogeneous data synchronization, internal resistance, digital twin.

**Вступ.** Стрімкий розвиток електричного транспорту та енергетичних накопичувачів супроводжується зростанням вимог до ефективності, надійності та безпеки акумуляторних систем, що функціонують під керуванням систем терморегулювання. Літій-іонні акумулятори (ЛІА) широко застосовуються завдяки високій безпеці, тривалому терміну служби та термічній стабільності. Водночас їх експлуатаційні характеристики залежать від температурного режиму та рівномірності розподілу температури під час роботи. Тому, особливої актуальності набувають задачі точного моделювання, моніторингу та прогнозування теплового стану ЛІА. Поєднання експериментальних методів і чисельного моделювання є основою для створення цифрових ЛІА, що дозволяє встановлювати взаємозв'язок між кінетикою реакцій, тепловиділенням та підвищувати ефективність керування, швидкість заряду та безпеку систем [1].

Особливу увагу привертають методи, що дозволяють інтегрувати експериментальні вимірювання з чисельними моделями в рамках єдиної інформаційно-аналітичної системи.

Сучасним напрямком розвитку таких підходів є технологія Digital Twin (DT). DT включає високочастотне зондування, адаптивне калібрування датчиків та гібридне моделювання фізики та штучного інтелекту (ШІ) для досягнення надточного прогнозування напруги ЛІА. Це вимагає об'єднання гетерогенних джерел інформації, зокрема електричних параметрів від BMS, температурних вимірювань та незалежних каналів контролю струму [2, 3].

**Мета роботи** – розробка підходу до збору, синхронізації та обробки багатоканальних гетерогенних експериментальних даних для подальшого використання в задачах електротеплового моделювання та ідентифікації параметрів акумуляторних систем.

**Постановка задачі**. Основною проблемою є відсутність інтегрованої системи збору, синхронізації та обробки багатоканальних даних (електричних, температурних і силових), які характеризуються різною частотою дискретизації та динамікою зміни. Це ускладнює встановлення коректних взаємозв'язків між електрохімічними процесами, теплогенерацією та деградаційними явищами в акумуляторі.

**Вирішення проблеми.** Експериментальна установка (рис. 1) призначена для комплексного збору та синхронізації даних про електричний і тепловий стан акумуляторного модуля, що складається з чотирьох послідовно з'єднаних призматичних комірок $LiFePO_4$ ємністю 125 А·год. Особливістю даної системи є наявність незалежних інформаційних каналів, які формують багатовимірний потік даних для подальшого аналізу та верифікації математичної моделі.

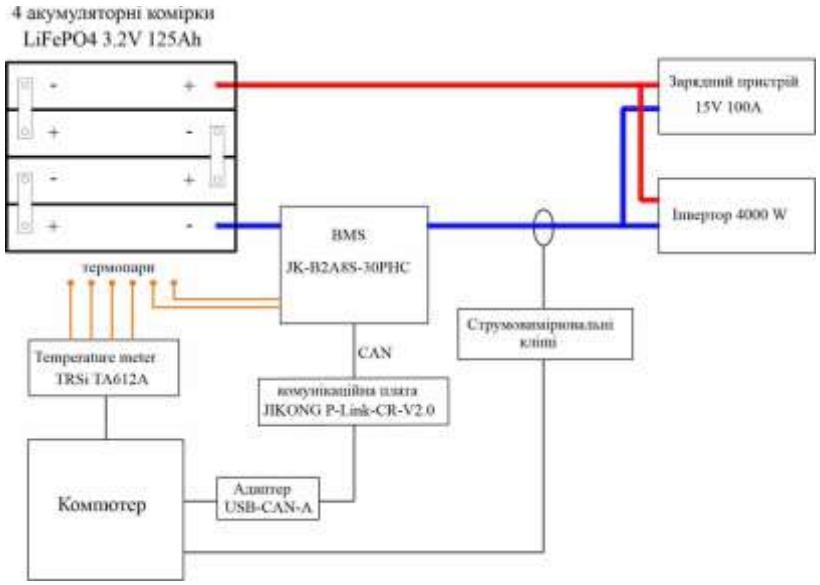



Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки та системи збору даних для акумуляторного модуля, включаючи канали електричних та теплових вимірювань

Центральним елементом збору електричних параметрів є система керування батареєю (BMS), яка забезпечує вимірювання напруги кожної комірки, загальної напруги батарейного модуля, струму заряджання/розряджання, стану заряду (SOC), температури, виміряної штатними датчиками BMS, з передачею даних на комп'ютер через CAN-інтерфейс. Для визначення температурного поля застосовано термопари типу K з багатоканальним цифровим логуванням. Струм визначається за допомогою струмовимірювальних кліщів із функцією запису даних.

Всі три інформаційні потоки (BMS, термопари, струм) синхронізуються в єдиній часовій шкалі на стороні комп'ютера. Це дозволяє сформувати узгоджений набір даних виду:

$$\{I(t), U(t), SOC(t), T_i(t)\},$$

де $T_i(t)$) – температури в контрольних точках.

Зібраний інформаційний потік використовується для вирішення двох ключових задач. Валідації чисельної моделі – порівняння експериментальних температурних кривих з результатами моделювання в COMSOL Multiphysics. Ідентифікації параметрів: підбору ефективних теплофізичних характеристик (теплопровідність, теплоємність) шляхом

мінімізації відхилення між експериментальними $T_{exp}(t)$ і розрахунковими $T_{model}(t)$ даними.

Оскільки вимірювальні канали працюють з різною частотою дискретизації та незалежними тактовими генераторами, всі сигнали були вирівняні за спільною часовою основою. Процедура синхронізації включала: вибір опорної часової шкали (часу комп'ютерної системи); інтерполяцію сигналів нижчої частоти для відповідності вищій доступній спільній частоті дискретизації; корекцію початкових часових зсувів.

Для кількісної оцінки узгодженості між експериментальними та змодельованими даними температури як основний показник використовувався середньоквадратичний корінь похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(T_{exp}(t_k) - T_{model}(t_k)\right)^2},$$

де $T_{exp}$ – експериментально виміряна температура, $T_{model}$ – змодельована температура, $N$ – кількість вибірок часу.

Оскільки внутрішній опір неможливо виміряти безпосередньо, коли струм стабільний, його знаходять у моменти зміни струму (наприклад, коли BMS вмикає навантаження або коли змінюється інтенсивність заряду). Згідно із законом Ома для повного кола:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{|U_2 - U_1|}{|I_2 - I_1|}_{int},$$

де $U_1$, $I_1$ – напруга та струм за мить до зміни; $U_2$, $I_2$ – напруга та струм одразу після зміни.

Внутрішній опір акумуляторних комірок є ключовим параметром, що визначає рівень джоулевого тепловиділення під час роботи батареї. На основі синхронізованих даних струму та напруги було визначено залежність внутрішнього опору комірок від стану заряду (SOC).

У діапазоні SOC≈20–80% значення опору змінюється незначно, що відповідає стабільному електрохімічному режиму роботи комірки. В області низьких значень SOC (<10%) спостерігається різке зростання опору, що пов’язано з обмеженням дифузійних процесів та зростанням поляризації електродів. При високих значеннях SOC опір змінюється від 3,157 до 4,63 мОм (збільшення майже у 1,5 раза). Отримані значення відповідають очікуваному рівню DCIR і є суттєво більшими за значення ACIR, виміряні на частоті 1 кГц.

**Висновки.** Запропоновано концепцію інформаційно-аналітичної платформи, яка забезпечує інтеграцію гетерогенних потоків даних (електричних характеристик, температурних полів). Ключовою перевагою платформи є синхронізація даних, що дозволяє коректно зіставляти швидкі електрохімічні перехідні процеси з інерційними тепловими відгуками системи.

Проведено ідентифікацію параметрів внутрішнього опору ($R_{int}$) та виконано порівняльний аналіз складників теплогенерації. Розрахунки порядку величини ентропійного тепла ($P_{rev} \approx 3{,}56$ Вт) відносно джоулевого нагріву ($P_J = 48{,}5$ Вт) показали, що для інтенсивних режимів експлуатації (1C і вище) внесок оборотних процесів складає менше 10%. Це дозволяє оптимізувати обчислювальну архітектуру систем моніторингу шляхом використання спрощених теплових моделей без суттєвої втрати точності.

## Список використаних джерел


1. Wang Z. Microchemical and electro-thermal operando analytical characterization of reaction kinetics, heat generation and interfacial degradation in lithium-ion batteries under extreme fast-charge/discharge conditions /Wang Z //Microchemical Journal. 2026. 224. 117904. https://doi.org/10.1016/j.microc.2026.117904.
2. Najafi-Shad S., Sciortino D, Resalati S., Henshall P., Morrey D. Digital twin-based prediction of battery parameters from limited initial data using an optimised time-series multi-layer perceptron / Najafi-Shad S., Sciortino D, Resalati S., Henshall P., Morrey D//Journal of Energy Storage. 2026. 148. 120194.
3. Khairy S., Hebatallah H., Abo-Khalil A., Aref M. A digital twin–enabled measurement and instrumentation framework for ultra-accurate short-term voltage prediction in lithium-ion batteries for electric vehicle applications /Khairy S., Hebatallah H., Abo-Khalil A., Aref M.// Next Energy. 2026. 12. 100612.

# АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ З ПОЧАТКОВИМ ВИГИНОМ НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

**Смоляр А.М.**[1], **Мірошкіна І.В.**[1], **Грецький Д.В.**[1], **Юрченко С.В.**[1], **Борковський А.Ш.**[2]
[1]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2]Варшавський технологічний університет, Варшава, Польща

**Анотація**. У роботі розглянуто задачу аналізу напружено-деформованого стану монолітних залізобетонних плит перекриття з початковим вигином. Метою дослідження є розроблення алгоритмічного забезпечення та комп'ютерної моделі на основі узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень. Об'єктом дослідження є плита перекриття, що працює у постановці плоскої деформації, предметом – її напружено-деформований стан з урахуванням початкового вигину. Методика дослідження базується на використанні рівнянь теорії пружності, їх редукції із застосуванням ортонормованих поліномів Лежандра та чисельного розв'язання методом дискретної ортогоналізації з інтегруванням задачі Коші методом Рунге–Кутти з автоматичним вибором кроку. Отримані результати демонструють суттєвий вплив початкового вигину на розподіл прогинів і напружень у плиті. Запропонований підхід забезпечує ефективність та чисельну стійкість розрахунків.

**Ключові слова**: комп'ютерна модель, плита перекриття, початковий вигин, узагальнений метод скінченних інтегральних перетворень, метод дискретної ортогоналізації, чисельні методи.

# ALGORITHMIC SUPPORT AND A COMPUTER MODEL FOR THE ANALYSIS OF FLOOR SLABS WITH INITIAL CURVATURE BASED ON THE GENERALIZED METHOD OF FINITE INTEGRAL TRANSFORMS

**Smoliar A.**[1], **Miroshkina I.**[1], **Gretskyi D.**[1], **Yurchenko S.**[1], **Borkowski A.**[2]
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

**Abstract.** The paper considers the problem of analyzing the stress-strain state of monolithic reinforced concrete floor slabs with initial curvature. The aim of the study is to develop algorithmic support and a computer model based on the generalized method of finite integral transforms. The object of the study is a floor slab operating under plane strain conditions, while the subject is its stress-strain state taking into account the initial curvature. The research methodology is based on the equations of elasticity theory, their reduction using orthonormal Legendre polynomials, and numerical solution by the method of discrete orthogonalization with integration of the Cauchy problem using the fourth-order Runge–Kutta method with automatic step-size control. The obtained results demonstrate a significant influence of the initial curvature on the distribution of deflections and stresses in the slab. The proposed approach ensures computational efficiency and numerical stability of the calculations.

**Keywords:** computer model, floor slab, initial curvature, generalized method of finite integral transforms, discrete orthogonalization method, numerical methods.

**Вступ**. Плити перекриття є одним із основних конструктивних елементів будівель і споруд. Вони мають значний вплив на несучу здатність, експлуатаційну надійність та матеріалоємність будівель [1]. У сучасній інженерній практиці значного поширення набувають конструкції з початковим вигином, що дозволяє підвищити їх жорсткість та ефективність роботи під навантаженням [2, 3].

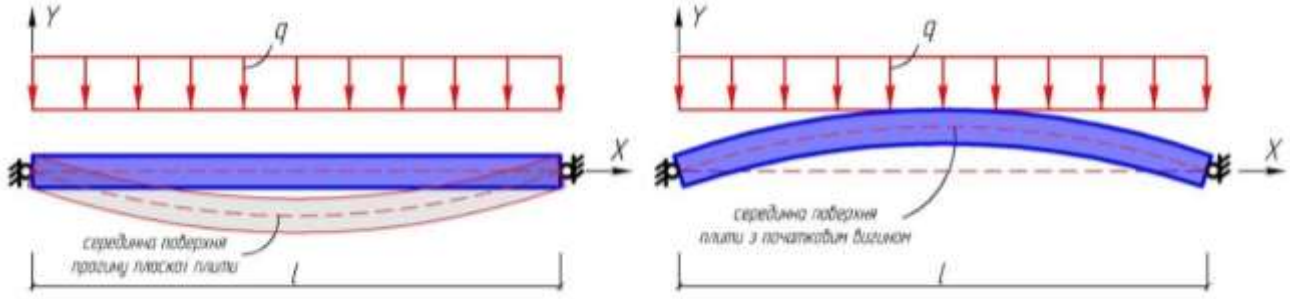
Разом із тим, врахування початкового вигину у задачах теорії пружності є складною науково-прикладною проблемою. Традиційні методи, зокрема метод скінченних елементів, потребують значних обчислювальних ресурсів та не завжди забезпечують ефективну інтерпретацію результатів. Разом із тим, у сучасних дослідженнях активно розвиваються підходи комп'ютерного моделювання криволінійних плитних конструкцій та задач попередньо напружених елементів [6].

У зв’язку з цим доцільним є використання узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень, який дозволяє виконувати математичну редукцію задачі та будувати ефективні чисельні алгоритми [1, 3].

**Мета роботи**. Метою роботи є розроблення алгоритмічного забезпечення та комп’ютерної моделі аналізу плит перекриття з початковим вигином на основі узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень.

**Постановка задачі**. Розглядається монолітна залізобетонна плита перекриття, яка працює у постановці плоскої деформації. Напружено-деформований стан вважається сталим уздовж осі $y$, що дозволяє звести задачу до двовимірної області [2].

Початковий вигин формується на основі геометрії прогину плоскої плити без початкової кривини, рис. 1, *а* [5].




*а* *б*

Рис. 1. Схема шарнірно обпертої плити: *а* – плоска плита; *б* – плита з початковим вигином

Отримана геометрія прогину використовується для побудови початкової геометрії шляхом її симетричного відображення та масштабування, рис. 1, *б* [4].

**Методика дослідження**. Математична модель плити перекриття базується на рівняннях теорії пружності. З урахуванням умови плоскої деформації, система рівнянь записується у вигляді:

- рівнянь рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0, \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0.$$

- фізичних співвідношень

$$\sigma_x = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \sigma_y = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \frac{\partial w}{\partial z},$$
$$\sigma_z = \lambda \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda + 2\mu)\frac{\partial w}{\partial z}, \quad \tau_{xz} = \mu\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right),$$

де $u(x,z)$, $w(x,z)$ – переміщення у напрямках $x$ та $z$; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження; $\tau_{xz}$ – дотичне напруження; $\lambda, \mu$ – коефіцієнти Ляме; $F_x, F_z$ – компоненти об’ємних сил.

Для розв’язання задачі застосовується узагальнений метод скінченних інтегральних перетворень, який дозволяє виконати редукцію вихідної системи рівнянь за координатою товщини $z$. Кожній функції-оригіналу $f(x,z)$ ставиться у відповідність її проєкційний аналог $f_i(x)$:

$$f_i(x) = \int_{h_z^-(x)}^{h_z^+(x)} f(x,z)P_i(\xi)dz,$$

а шукані функції представляються у вигляді розкладу за нормованими поліномами Лежандра:

$$f(x,z) \approx \sum_{i=0}^{N_Z} f_i(x)P_i(\xi),$$

де $P_i(\xi)$ – поліноми Лежандра, $f_i(x)$ – функції розкладу, а безрозмірна координата $\xi$ визначається через геометрію області по товщині [1]. Використання ортонормованих поліномів Лежандра як базисних функцій узгоджується з сучасними спектральними та

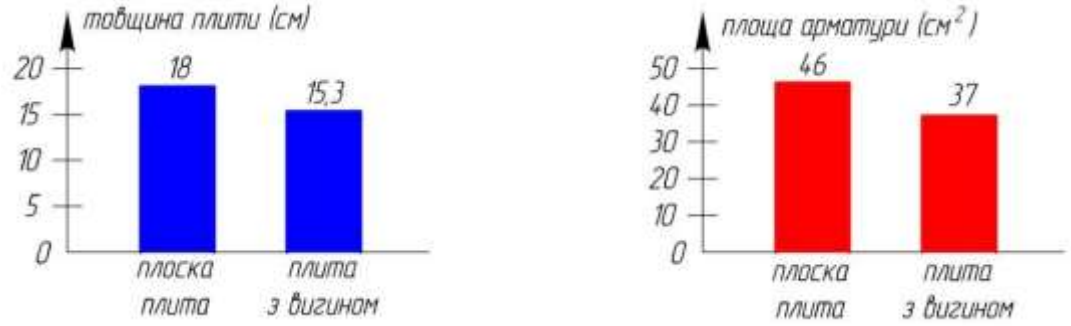
проєкційними методами розв’язання крайових задач математичної фізики [6].

Редукція здійснюється із використанням розробленої таблиці проєкційних співвідношень, що формалізує перехід від функцій та операторів до їх проєкційних аналогів. У результаті отримується система звичайних диференціальних рівнянь першого порядку.

Для чисельної реалізації математичної моделі створений алгоритм на основі методу дискретної ортогоналізації з інтегрування задачі Коші за методом Рунге-Кутти з автоматичним вибором кроку, що забезпечує стійкість і збіжність чисельного процесу.

Розроблений алгоритм реалізовано у програмному комплексі INTEGRAL-SV, що забезпечує автоматичне формування редукованої системи рівнянь та отримання чисельних розв’язків [3].

Ефективність початкового вигину демонструється на рис. 2 порівнянням плоскої залізобетонної плити перекриття та відповідної плити з початковим вигином. Довжина плити становить $l$=6,0 м, ширина – $b$=3,0 м, товщина – $h$=0,18 м. Плита завантажена по верхній боковій поверхні рівномірно розподіленим навантаженням інтенсивністю $q$=0,01 МПа.




*а* *б*

Рис. 2. Діаграми зменшення товщини (*а*) та кількості арматури (*б*) плити перекриття з початковим вигином у порівнянні з плоскою плитою

**Висновок**. Розроблено алгоритмічне забезпечення аналізу плит перекриття з початковим вигином. Показано ефективність застосування узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень для зниження розмірності задачі. Встановлено суттєвий вплив початкового вигину на напружено-деформований стан плити.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні узагальненого методу скінченних інтегральних перетворень до задач аналізу плит перекриття з початковим вигином.

## Список використаних джерел


1. Чибіряков В.К., Смоляр А.М. Теорія товстих пластин та оболонок: Монографія. друк., Черкаси: ЧДТУ, 2002. – 160 с.: іл.
2. Smoliar, A., Miroshkina, I. (2024). Computer Modeling of Strengthening Mechanics of Glass Structural Elements by Compressive Stresses. In: Faure, E., *et al.* Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-71801-4_33
3. Smolyar A.M., Miroshkina I.V., Yurchenko S. V. Strain state of zero-deflection plates. Materials Science. September 2015. V. 51. I. 2. P. 276–280. doi: 10.1007/s11003-015-9840-x
4. Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Середенко Б.В. (2025) Натурний експеримент та комп’ютерне моделювання згину балки з будівельним вигином. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2025, Випуск 23, с. 321-330. doi: 10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-28
5. Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Юрченко С.В., Романченко В.Р. Комп’ютерне моделювання впливу умов закріплення кінців балки з будівельним вигином на перерозподіл нормальних напружень. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2024, Випуск 21, с. 216-223. doi: 10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-23
6. Canuto C., Hussaini M.Y., Quarteroni A., Zang T.A. Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains. Berlin–Heidelberg: Springer, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-30726-6

# ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ МЕМС СЕНСОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Феоклістов Д.О., Богдан Г.А.**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

**Абстракт.** У роботі досліджується проблема температурних похибок мікроелектромеханічних (МЕМС) сенсорів. Традиційні методи компенсації базуються на натурному експериментальному калібруванні, що характеризується високими витратами часу та ресурсів, а також обмеженою масштабованістю. У сучасних підходах дедалі більшого поширення набувають комп'ютерні моделі, зокрема методи машинного навчання, які дозволяють апроксимувати нелінійну температурну залежність похибок сенсорів. У роботі розглянуто концепцію використання таких моделей не як заміни експерименту, а як інструменту зменшення обсягу необхідних вимірювань. Метою роботи є аналіз ефективності використання комп'ютерних моделей, зокрема методів машинного навчання, для компенсації температурних похибок МЕМС сенсорів, а також визначення їх ролі як інструменту зменшення обсягу натурних експериментів. Об'єктом дослідження є процес формування температурних похибок у МЕМС-системах, а предметом — алгоритми компенсації дрейфу нуля та зміни масштабного коефіцієнта. Проведено порівняльний аналіз експериментального, модельного та гібридного підходів. Показано, що найбільш ефективною стратегією є гібридний підхід, який поєднує обмежену експериментальну базу з можливостями машинного навчання. Отримані результати можуть бути використані при розробці ефективних методів температурної компенсації МЕМС сенсорів у вбудованих системах.

**Ключові слова:** МЕМС-сенсори, моделювання, температурне калібрування, гібридні моделі.

# OPTIMIZATION OF TEMPERATURE TESTS OF MEMS SENSORS USING COMPUTER MODELING

**Feoklistov D., Bohdan H.**
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper investigates the problem of temperature errors of microelectromechanical (MEMS) sensors. Traditional compensation methods are based on full-scale experimental calibration, which is characterized by high time and resource costs, as well as limited scalability. In modern approaches, computer models, in particular machine learning methods, are becoming increasingly widespread, which allow approximating the nonlinear temperature dependence of sensor errors. The paper considers the concept of using such models not as a replacement for experiment, but as a tool for reducing the volume of necessary measurements. The purpose of the paper is to analyze the effectiveness of using computer models, in particular machine learning methods, to compensate for temperature errors of MEMS sensors, as well as to determine their role as a tool for reducing the volume of full-scale experiments. The object of the study is the process of forming temperature errors in MEMS systems, and the subject is algorithms for compensating for zero drift and changing the scale factor. A comparative analysis of experimental, model and hybrid approaches is carried out. It is shown that the most effective strategy is a hybrid approach that combines a limited experimental base with machine learning capabilities. The results obtained can be used in the development of effective methods for temperature compensation of MEMS sensors in embedded systems.

**Keywords:** MEMS sensors, modeling, temperature calibration, hybrid models.

**Вступ.** Температурні похибки МЕМС-сенсорів, зокрема зсув нуля, зміна масштабного коефіцієнта та нелінійні ефекти, істотно обмежують точність навігаційних та робототехнічних систем [1]. Температурні коливання спричиняють дрейф сигналу та порушення стабільності метрологічних характеристик, що знижує достовірність визначення параметрів руху та орієнтації.

Традиційне експериментальне калібрування є ресурсомістким, потребує спеціалізованих умов і погано масштабується, особливо при масовому використанні сенсорів. Альтернативою є застосування комп'ютерного моделювання та методів машинного

навчання, які дозволяють ефективно описувати нелінійні залежності, підвищувати точність компенсації похибок і узагальнювати дані шляхом інтерполяції [2].

**Мета роботи.** Метою роботи є аналіз ефективності використання комп'ютерних моделей, зокрема методів машинного навчання, для компенсації температурних похибок МЕМС сенсорів, а також визначення їх ролі як інструменту зменшення обсягу натурних експериментів. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні гібридного підходу, що поєднує обмежені експериментальні дані, комп'ютерне моделювання та методи машинного навчання для зменшення обсягу калібрувальних вимірювань.

**Постановка задачі.** Температурна похибка МЕМС-сенсорів є нелінійною багатофакторною залежністю, що ускладнює побудову універсальних моделей компенсації [3].

У зв'язку з цим актуальним є порівняльний аналіз експериментального, модельного та гібридного підходів, а також визначення умов, за яких комп'ютерні моделі є достатньо точними, і випадків, коли натурний експеримент залишається необхідним.

**Вирішення проблеми.** Підходи до компенсації температурних похибок МЕМС-сенсорів поділяються на експериментальні, модельні та гібридні [4].

Експериментальні методи забезпечують високу точність, але є ресурсомісткими. Модельні підходи дозволяють апроксимувати нелінійні залежності, однак залежать від якості навчальних даних [5, 6].

Для оцінки ефективності модельних підходів виконано чисельне моделювання температурної похибки МЕМС сенсора в діапазоні від -20°C до 80°C. Через відсутність повномасштабних вимірювань використано підхід на основі моделювання, що є обґрунтованим завдяки добре дослідженому характеру температурного дрейфу в MEMS-сенсорах. Відомо, що цей дрейф має плавну нелінійну природу з адитивними стохастичними збуреннями, зумовленими тепловим шумом і виробничими варіаціями.

Для відтворення реалістичної поведінки сенсора використано синтетичну модель температурного дрейфу, сформовану як комбінація лінійної та квадратичної складових, гармонійної компоненти та адитивного гаусового шуму. Це дозволяє коректно порівнювати алгоритми компенсації за однакових умов, зберігаючи ключові характеристики теплової динаміки МЕМС.

Результати моделювання наведено на рис. 1, де показано порівняння вихідного сигналу, зашумлених вимірювань і результатів компенсації різними моделями.

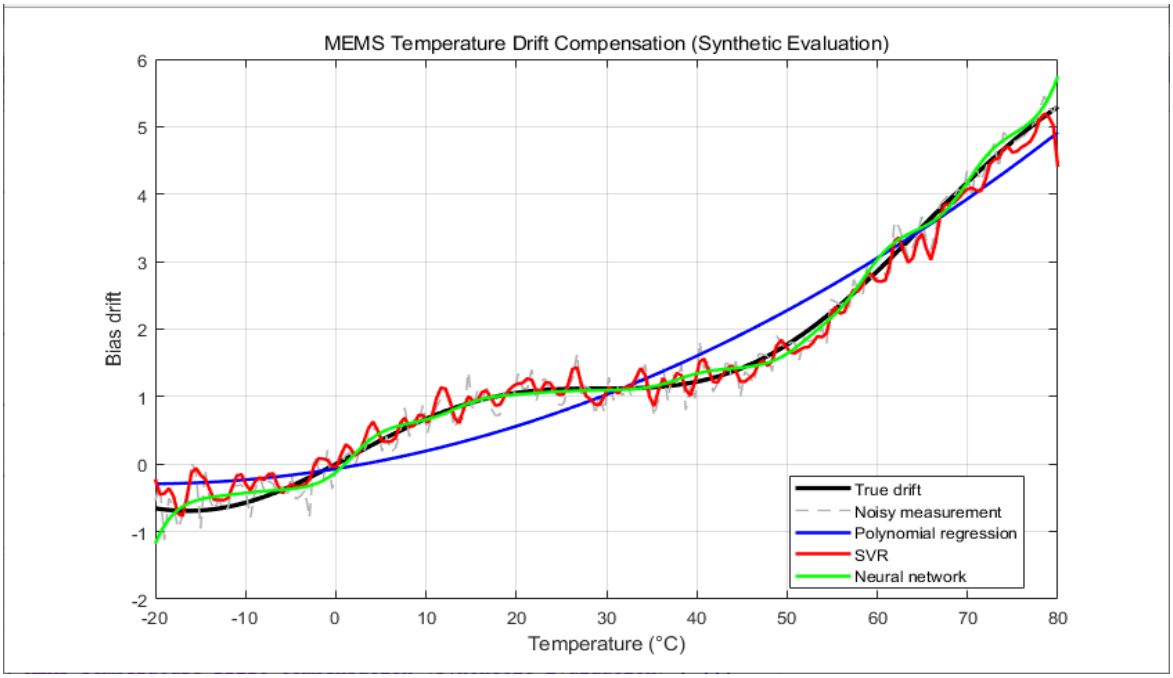



Рис. 1. Моделювання температурно-залежного дрейфу зміщення MEMS-сенсора та порівняння методів компенсації на основі поліноміальної регресії, регресії опорних векторів та нейромережевих моделей

Для компенсації похибок використано поліноміальну регресію другого порядку, регресію опорних векторів із гаусовим ядром та одношарову нейронну мережу з 10 нейронами прихованого шару. Розглянуті моделі обрано як базові представники різних класів алгоритмів компенсації. Результати оцінювались за розміром середньоквадратичної похибки (RMSE), яка склала: для поліноміальної моделі – 0.3546, для SVR – 0.2016, для нейромережевої моделі – 0.1108.

Гібридні підходи поєднують переваги обох стратегій, використовуючи експериментальні дані для початкового калібрування та комп'ютерні моделі для узагальнення характеристик сенсора [7]. Такий підхід дозволяє зменшити обсяг необхідних вимірювань без суттєвої втрати точності. Критично важливим є те, що ефективність моделей найбільш висока в режимах інтерполяції, тоді як екстраполяція та екстремальні температурні умови потребують експериментального підтвердження.

**Висновки.** У роботі показано, що комп'ютерні моделі температурних похибок МЕМС-сенсорів є ефективним інструментом зменшення обсягу натурних експериментів і прискорення процесу калібрування, проте не здатні повністю їх замінити. Найбільш перспективним підходом визначено гібридні методи, які поєднують експериментальні дані з алгоритмами машинного навчання, забезпечуючи баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Встановлено, що експериментальні методи забезпечують максимальну точність і надійність результатів, однак супроводжуються значними витратами часу та ресурсів. Водночас модельні підходи характеризуються високою гнучкістю, здатністю до узагальнення та можливістю застосування в різних умовах експлуатації, проте їх ефективність суттєво залежить від якості та репрезентативності вихідних даних.

Отримані результати підтверджують доцільність використання комп'ютерного моделювання як інструменту оптимізації та скорочення експериментального процесу, зокрема для попередньої оцінки характеристик сенсорів і зменшення кількості необхідних вимірювань, але не як повної альтернативи натурним дослідженням.

## Список використаних джерел


1. Guo G., Chai B., Cheng R. and Wang Y. (2023). Temperature drift compensation of a MEMS accelerometer based on DLSTM and ISSA. Sensors, 23(4), 1809. doi: 10.3390/s23041809
2. Wang X. and Cao H. (2020). Temperature drift modeling and compensation of micro-electro-mechanical system gyroscope based on improved support vector machine algorithms. International Journal of Distributed Sensor Networks, 16(3), 1550147720908195. doi: 10.1177/1550147720908195
3. Guo Y., Zhang Z., Chang L. et al. (2024). Temperature compensation for MEMS accelerometer based on a fusion algorithm. Micromachines, 15(7), 835. doi: 10.3390/mi15070835
4. Li M., Ma Z., Zhang T. et al. (2023). Temperature bias drift phase-based compensation for a MEMS accelerometer with stiffness-tuning double-sided parallel plate capacitors. Nanomanufacturing and Metrology, 6(1), 22. doi: 10.1007/s41871-023-00202-9
5. Shen, Y., Zheng, X., Fang, C., Zeng, J., Hu, W., & Jin, Z. (2026). A temperature self-calibrated MEMS gyroscope with 0.007°/h/K bias drift coefficient using real-time parametric quality factor control and mode matching. Microsystems & Nanoengineering, 12(1), 102. doi: 10.1038/s41378-026-01181-9
6. Hong L., Xiao K., Song X. et al. (2025). System-level modeling with temperature compensation for a CMOS-MEMS monolithic calorimetric flow sensing SoC. Microsystems & Nanoengineering, 11(1), 13. doi: 10.1038/s41378-024-00853-8
7. Cao, H., Li, H., Sheng, X., Wang, S., Yang, B., & Huang, L. (2013). A novel temperature compensation method for a MEMS gyroscope oriented on a periphery circuit. International Journal of Advanced Robotic Systems, 10(9), 327. doi: 10.5772/56759

# ВДОСКОНАЛЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ШОРСТКОСТІ ШЕЗІ НА ОСНОВІ АНСАМБЛЕВОГО НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ГІДРОМЕХАНІКИ

**Ходневич Я.В.[1], Корбутяк В.М.[2]**
[1]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна
[2] Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто задачу прогнозування коефіцієнта шорсткості Шезі на основі емпіричних даних про характеристики відкритих водних потоків. Як базову модель використано індивідуальну нейронну мережу, яка призначена для оцінювання коефіцієнта Шезі за вхідними гідравлічними параметрами. З метою підвищення точності прогнозування запропоновано підхід на основі ансамблевого навчання, що передбачає формування однорідного ансамблю з трьох однотипних нейронних мереж, навчених із використанням методу беггінгу. На етапі агрегування результати прогнозування аналізуються в рамках оберненої одновимірної задачі гідромеханіки, що дозволяє обрати значення коефіцієнта Шезі, для якого відповідна розрахункова швидкість потоку найбільш узгоджується з емпіричними даними. Реалізацію моделей нейронних мереж виконано з використанням засобів Python. За результатами обчислювальних експериментів встановлено, що запропонований ансамблевий підхід забезпечує підвищення точності прогнозування: зменшення відносних похибок та покращення значень коефіцієнта ефективності Неша–Сатклiффа.

**Ключові слова:** коефіцієнт шорсткості Шезі, прогнозування, нейронні мережі, ансамблеве навчання, беггінг, обернена задача гідромеханіки, відкриті водні потоки, Python.

# ENHANCING NEURAL NETWORK–BASED PREDICTION OF THE CHEZY ROUGHNESS COEFFICIENT VIA ENSEMBLE LEARNING AND AN INVERSE HYDROMECHANICS PROBLEM

**Khodnevych Y.[1], Korbutiak V.[2]**
[1] Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2] National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

**Abstract.** This paper investigates the prediction of the Chezy roughness coefficient using empirical data from open-channel flows. A single neural network serves as the baseline model for estimating the Chezy coefficient based on input hydraulic parameters. To enhance prediction accuracy, an ensemble learning approach is proposed, utilizing a homogeneous ensemble of three neural networks with the same architecture trained via the bagging method. At the aggregation stage, the predicted values are analysed within the framework of an inverse one-dimensional hydromechanics problem. This analysis enables the selection of the Chezy coefficient value corresponding to the computed flow velocity that best matches the empirical observations used as input to the neural networks. The neural network models are implemented in Python. Computational experiments demonstrate that the proposed ensemble approach improves prediction accuracy, as evidenced by reduced relative errors and improved Nash–Sutcliffe efficiency values.

**Keywords**: Chezy roughness coefficient, prediction, neural networks, ensemble learning, bagging, inverse hydromechanics problem, open-channel flow, Python.

**Вступ**. Розглядається задача прогнозування коефіцієнта шорсткості Шезі на основі обмежених польових даних про гідрологічні та гідро-морфологічні характеристики водних потоків у відкритих руслах, зокрема, гірських річок. Отримання точних і надійних прогнозів коефіцієнта Шезі на основі емпіричних даних є критично важливим для підтримки математичного моделювання річкових течій для багатьох інженерних та екологічних завдань в галузі водного господарства, зокрема, моделювання паводкових потоків та повеней, моделювання наслідків прориву дамб, прогнозування загальної та локальної ерозії русла річки та ін. Цей емпіричний коефіцієнт здатний враховувати

більшість чинників, що визначають гідравлічний опір в умовах річок, для яких характерна постійна мінливість їх морфологічних та гідрологічних параметрів [1].

Така задача представлена в наших дослідженнях [1-3], які включали в себе огляд методів обчислення коефіцієнта Шезі, розробку структури даних для навчання штучної нейронної мережі (ШНМ), розробку базової моделі нейронної мережі (НМ). Як базову модель використано індивідуальну нейронну мережу (1) [2], яка призначена для оцінювання коефіцієнта Шезі $C$ за вхідними гідрологічними та гідро-морфологічні параметрами річкового потоку: $n$ – коефіцієнт опору Гоклера-Меннінга, $S_f$ – ухил поверхні води, $B$ – середня ширина потоку, $\Delta$ – висота виступів шорсткості, $h$ – середня глибина потоку, $R$ – гідравлічний радіус. Приймається умова, що мультиколінеарність між цими параметрами є відсутня або нею можна знехтувати.

$$C = f(x_1, x_2),\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}. \quad (1)$$

Апроксимація неперервних функцій $C = f(x_1, x_2)$ в рамках обчислювальної моделі (1) здійснюється на основі повно-зв'язаної штучної нейронної мережі прямого поширення з одним прихованим шаром. В нейронах прихованого шару застосовується сигмовидна логістична функція активації, вихідний нейроном – лінійний. Навчання такої базової НМ здійснюється за допомогою методу зворотного поширення помилки [2].

Навчання та тестування НМ проводилися на основі гідро-морфологічних польових даних окремих ділянок гірських річок Тиса, Тересва, Латориця, Опір, Ріка, Чорний Черемош. Оцінка ефективності моделі НМ полягала у порівнянні спостережуваних $Q_o$ і прогнозованих $Q_p$ витрат води ($Q_p$ визначалась за допомогою коефіцієнта Шезі $C_p$, обчисленого за допомогою нейронної мережі). Встановлено, відносні похибки прогнозованих значень витрати води $Q_p$ коливались в межах 0,3% ÷ 12,4%, коефіцієнт ефективності моделі Неша-Сатклiффа (NSE) = 0,939 [3].

**Метою роботи** є покращення моделі для прогнозування коефіцієнта шорсткості Шезі на основі індивідуальної нейронної мережі. Для підвищення точності прогнозування базової моделі нейронної мережі пропонується підхід на основі ансамблевого навчання та оберненої задачі гідромеханіки.

**Постановка задачі.** Розглядається задача обчислення наближеного значення коефіцієнта шорсткості Шезі $\widetilde{C}$ за допомогою ансамблю ШНМ згідно моделі [4]:

$$\widetilde{C}(x_1, x_2) = C_A \pm \varphi,\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}, \quad (2)$$

$$\varphi = (C_o - \overline{C}) \cdot \xi, \quad (3)$$

$$\xi = 1,\ C_o > \overline{C}, \quad (4)$$

$$\xi = -1,\ C_o < \overline{C}. \quad (5)$$

де $C_A = f(x_1, x_2)$ – значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні, що обчислюється за допомогою базової НМ; $\varphi = f(x_1, x_2)$ – величина уточнення, яка встановлюється за допомогою двох додаткових НМ, що також побудовані на основі базової моделі мережі; $C_o$ – еталонне значення коефіцієнта Шезі в рамках досліджуваної предметної області, $\overline{C}$ – середнє значення всіх $C_o$ базової вибірки навчальних прикладів, $\xi$ – регулює знак величини $\varphi$.

**Розв'язання задачі.** На основі обчислювальної моделі (2)-(5) розглядається однорідний ансамбль, який складається з трьох однотипних повно-зв'язних нейронних мереж прямого поширення. Основна модель ансамблю є по суті базовою НМ (1) та призначена для визначення коефіцієнта Шезі в першому наближенні $C_A$. Дві додаткові моделі також побудовані на основі емпіричної моделі (1), але виконують прогнозування відповідно величин $\varphi_1 = +\varphi$, $\varphi_2 = -\varphi$, які використовуються для уточнення $C_A$ згідно (2). Навчання ансамблю нейронних мереж здійснюється згідно методу беггінгу (Bagging) [5]. Кожна з нейронних мереж навчається паралельно за допомогою методу зворотного поширення похибки на окремій підвибірці навчальних даних. Такі підвибірки навчальних

прикладів формуються на основі базової навчальної вибірки моделі (1) згідно умов беггінгу з дотриманням безперервності, однорідності та нормалізації. Для навченого ансамблю нейронних мереж наближена оцінка коефіцієнта Шезі виконується за допомогою агрегування прогнозів трьох моделей із застосуванням методу максимального голосування на основі вирішення оберненої задачі [6]. Для нових вхідних даних моделі НМ дозволяють отримати три прогнозні значення коефіцієнта Шезі. На етапі агрегування ці прогнози аналізуються в рамках оберненої одновимірної задачі гідромеханіки, що дозволяє обрати значення коефіцієнта Шезі, для якого відповідна розрахункова середня швидкість потоку найкраще узгоджується з вхідними емпіричними даними [4].

Реалізацію моделей базової (індивідуальної) нейронної мережі та ансамблю нейронних мереж виконано з використанням засобів Python та представлено у [7].

Апробацію запропонованого однорідного ансамблю нейронних мереж для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі виконано на основі згаданих вище гідрологічних та гідроморфологічних польових даних окремих ділянок гірських річок, так як це представлено у [3]. Розглядалась задача порівняння спостережуваних $Q_o$ і прогнозованих $Q_p$ значень витрат води. Відносні похибки обчислених прогнозів отримано в межах 0,3% ÷ 6,1%. Значення коефіцієнта ефективності моделі Неша-Сатклiффа = 0,991.

**Висновок**. За результатами обчислювальних експериментів на основі обмежених польових даних про характеристики ділянок гірських річок встановлено, що у порівнянні з індивідуальною нейронною мережею запропонований ансамблевий підхід забезпечує підвищення точності прогнозування коефіцієнта Шезі, про що свідчить зменшення відносних похибок та покращення значень коефіцієнта ефективності Неша–Сатклiффа.

Ключовою особливістю запропонованої моделі однорідного ансамблю нейронних мереж є фізично обґрунтований відбір (агрегування) прогнозу коефіцієнта Шезі через середню швидкість потоку в рамках оберненої задачі гідромеханіки. Зокрема, такий підхід дозволив зменшити діапазон відносних похибок прогнозування з 0,3% ÷ 12,4% (для індивідуальної нейронної мережі) до 0,3% ÷ 6,1% (для ансамблю нейронних мереж).

## Список використаних джерел


1. Stefanyshyn, D. V., Khodnevich, Y. V., Korbutiak, V. M. Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. Environmental safety and natural resources, 39 (3), 16–43. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43, (2021).
2. Khodnevych, Y. V., Stefanyshyn, D. V. Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chezy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels. Екологічна безпека та природокористування, 42 (2), 59-85. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85, (2022).
3. Khodnevych, Y., Stefanyshyn, D., Korbutiak, V. The Chezy Roughness Coefficient Computing Using an Artificial Neural Network to Support the Mathematical Modelling of River Flows. Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 809, pp. 444-458. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_26, (2023).
4. Ходневич Я., Корбутяк В. Прогнозування коефіцієнта гідравлічного опору за допомогою алгоритму ансамблевої нейронної мережі. Екологічна безпека та природокористування, 4 (56), 154-173. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.154-173, (2025).
5. Gautam Kunapuli. Ensemble Methods for Machine Learning. Published by Manning, 352 p., (2023)
6. Mohammed, A., and Kora, R. A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges. Journal of King Saud University. Computer and Information Sciences, 35, 757-774. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.01.014, (2023).
7. Khodnevych, Ya. Software Implementation of a Computational Algorithm for Training an Ensemble of Neural Networks to Predict the Chezy Roughness Coefficient. Available from https://github.com/yakhodnevych/ANNE_approximation_C.git, (2025).

# IMPROVING INFORMATION AND ANALYTICAL APPROACHES TO VIBRATION MONITORING FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF EQUIPMENT CONDITION

**Antonenko N., Hrinchenko H., Lysenko A., Kotelevets K.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., 61000 Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This paper examines ways of improving information and analytical approaches to vibration monitoring with a view to enhancing the effectiveness of managing the technical condition of compressor station equipment. The object of the study is the process of vibration diagnostics for gas transmission equipment, whilst the subject is methods for processing and analysing vibroacoustic signals to assess technical condition. The aim of the work is to improve the reliability of diagnostics and the effectiveness of management decision-making based on the integration of modern information technologies. The study utilises methods of spectral, correlation and cepstral signal analysis, mathematical modelling, as well as methods of statistical data processing. An approach is proposed for the development of an information and analytical vibration monitoring system that ensures early detection of defects and prediction of the technical condition of equipment. The results obtained make it possible to improve diagnostic accuracy, reduce the risk of accidents and optimise maintenance processes.

**Keywords**: Vibration Monitoring, Vibration Diagnostics, Information Technology, Technical Condition, Gas Transmission Equipment, Effective Management, Spectral Analysis.

**Introduction**. The current state of gas transmission equipment is characterised by a high degree of wear and tear and increased demands on operational reliability and safety. Traditional approaches to maintenance, in particular the system of scheduled and preventive repairs, do not provide the necessary efficiency [1,2].

The high sensitivity of the vibroacoustic state of various types of industrial equipment to changes in its technical condition has led to the widespread use of vibroacoustic methods in diagnostics; however, the downside of this sensitivity is the following circumstances associated with the vibroacoustic monitoring of gas-handling units:

- reference data (vibroacoustic standards), typically obtained experimentally, apply to a single type of unit and do not account for the specific characteristics of individual units of that type;
- the installation and operating conditions of the units require the specific characteristics of the unit under investigation within this type to be taken into account;
- the operating mode of gas pumping units (GPUs) does not permit vibration testing that involves active interference with the unit's operation.

The increments in diagnostic features are small, and a linear model is used, which does not always reflect reality. Furthermore, the defect is detected based on the trend of a component $\zeta(t)$ of the state vector $\bar{\zeta}$ when the point of its exponential growth occurs. In general, determining the component $\zeta(t)$ and the time at which its exponential growth begins is insufficient for diagnosis, as reaching threshold values $\zeta_{np}(t)$ is a more important parameter. It is also worth noting that the proposed algorithms have not been implemented in industrial operation [3–5].

A common shortcoming of the algorithms [6–9] is that no quantitative assessment of vibration level normalisation has been carried out, diagnostic features of defects have not been distinguished, and the requirements for defect detection with a search depth down to the component level have not been met. First and foremost, these requirements must include the reliability and accuracy of diagnostic information [10]. The developed diagnostic algorithms [11–12] do not meet the requirements for analysing accuracy and reliability and require significant refinement.

In this regard, there is a pressing need to implement information and analytical systems for vibration diagnostics, which enable real-time monitoring of the technical condition of equipment.

**The aim of this work** is to improve the efficiency of managing the technical condition of gas transmission equipment by refining information and analytical approaches to vibration monitoring.

**Formulation of the problem**. Existing methods of vibration diagnostics are largely based on the analysis of individual vibration parameters and do not provide a comprehensive assessment of the technical condition.

The limited information content of the signals and the insufficient integration of data processing methods make it difficult to detect defects in a timely manner and to make effective management decisions.

**Solving the problem**. An approach is proposed for developing an information and analytical system for vibration monitoring, based on the integrated use of spectral, correlation and cepstral analysis of vibroacoustic signals.

The main method of theoretical research is mathematical modelling using identification techniques [13–16] and the application of information technologies to implement the algorithm. A dynamic and mathematical model of the vibrating circuits of the GPUs, centrifugal supercharger (CSC) and gas turbine unit (GTU) is constructed, and differential equations of vibration are formulated and solved using linear and non-linear vibration theory. The most common description of vibration is obtained using a harmonic or polyharmonic process with a linear spectrum, which is a simple and convenient model and accurately reflects a number of important properties of vibration [17].

A quasi-deterministic vibration model is used, with different realisations of which may vary in amplitude, frequency and initial phase. This form of representing the vibroacoustic signal models quite well the increase in the noise component as the degree of wear on the contacting surfaces of the gear teeth in the gearbox or in the rolling bearings increases, or as a result of impact disturbance. More concentrated information on the properties of the random process was obtained from the momentary characteristics [18]. For this purpose, a dimensionless characteristic known as the excess is considered:

$$K_{e\kappa} = \left[\frac{M(u^4)}{\sigma^4(u)}\right] - 3. \quad (1)$$

For a normal distribution $K_{e\kappa} = 0$. If the empirical probability density curve has a sharper and higher peak than the normal distribution curve, then $K_{e\kappa} > 0$.

The next stage involves spectral correlation analysis using software applications that enable any form of vibroacoustic signal processing during experimental research and practical diagnostics of compressor station equipment. The following relationships exist between the time function $x\,(t)$ and its representation in the frequency domain $X(\omega)$ :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) \cdot exp(i\omega t)\, d\omega; \quad X(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot exp(-i\omega t)\, dt, \quad (2)$$

which are referred to as the forward and inverse Fourier transforms [19]. The correlation functions of stationary ergodic processes $x(t)$ and $y(t)$ with mean zero are given by the following expressions:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \int_0^T x(t) \cdot x(t+\tau)dt; \quad R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau)dt. \quad (3)$$

The correlation function $R_{xx}(t)$ is even, whereas the cross-correlation function $R_{xy}(t)$ is not even, but satisfies the following relation:

$$R_{xy}(-\tau) = R_{xy}(\tau), \quad \left|R_{xy}(\tau)\right| \le \sqrt{R_{xx}(0) \cdot R_{yy}(0)}, \quad (4)$$

which allows the introduction of a normalised cross-correlation function.

To compress spectral information, non-linear transformations are employed, for example, logarithmisation of the spectrum followed by a Fourier transform [20]. Later, the standard inverse Fourier transform of the logarithmic power spectrum began to be used to calculate the cepstrum [21]:

$$K_{xx}(\tau) = \Phi^{-1}[lg\ \ G_{xx}(f)].$$

As a non-linear transformation, the cepstrum possesses a number of remarkable properties that set it apart from the standard correlation function.

The final stage of vibroacoustic diagnostics involves the development of methods for determining the technical condition of gas turbine engine components and assemblies, defect detection and service life prediction. The research methods are based on pattern recognition theory. If the mathematical model of the vibrating circuits is known, algorithms are developed to identify diagnostic signs of faults from the signal. If vibroacoustic diagnostics of parts and assemblies is interpreted as the recognition of classes of technical conditions, distinguished by a set of characteristics, then the recognition algorithms are based on comparing the degree of similarity of a given condition to each class. Here, simple comparisons were used in specific frequency ranges, binary-octal codes and Fibonacci number codes in the distribution of amplitudes across different frequency harmonics. Hamming distance and Euclidean distance were applied to specially selected discrete spectral components. In this case, the most commonly used measure of similarity is the scalar product of two vectors or the normalised correlation function. Probabilistic estimates of the difference between the compared spectra across the entire frequency range were employed. Histograms and probability moments of the distributions of the spectrum differences were constructed [22], and based on these, a signal processing model was developed that allows defects to be identified at early stages of their development and their location to be determined.

The integration of data processing algorithms into software systems enables the automation of diagnostic processes and the generation of recommendations for managing the technical condition of equipment. The proposed approach facilitates the transition from scheduled maintenance to condition-based maintenance.

**Conclusion**. Information and analytical approaches to vibration monitoring have been refined, thereby improving the accuracy of diagnostics and the effectiveness of equipment condition management. The proposed solutions help to reduce operating costs, enhance equipment reliability and prevent breakdowns.

## References


1. Hrinchenko, H., Udovychenko, V., Generalov, O., Parfentieva, O., Neskhodovskyi, I., & Kopacz, M. (2024). Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal, 27*(3), 109–132. https://doi.org/10.33223/epj/190811
2. Hrinchenko, H., Filipishyna, L., Antonenko, N., Ivanov, M., & Tarasov, I. (2025). Advanced diagnostic and management approaches for control systems in energy infrastructure integrity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1576*, 012010. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1576/1/012010
3. Sharko, A., Stepanchikov, D., Sharko, O., Buketov, A., Louda, P., Maslyiak, B., Kyrylovych, V., Svyrydov, V., Czarnywojtek, P., Dębczyński, M., Łoś, P., & Łoś, K. E. (2025). Information indicators of occurrence and monitoring of material structure degradation in vibrodiagnostic systems during loading. *Materials, 18*(24), 5507. https://doi.org/10.3390/ma18245507
4. Pedregal, D. J., & Carnero, M. C. (2009). Vibration analysis diagnostics by continuous-time models: A case study. *Reliability Engineering & System Safety, 94*(2), 244–253. https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.03.003
5. Romanssini, M., de Aguirre, P. C. C., Compassi-Severo, L., & Girardi, A. G. (2023). A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng, 4*(3), 1797–1817. https://doi.org/10.3390/eng4030102
6. Aloisio, A., Di Battista, L., Alaggio, R., & Fragiacomo, M. (2020). Sensitivity analysis of subspace-based damage indicators under changes in ambient excitation covariance, severity and location of damage. *Engineering Structures, 208*, 110235. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110235
7. Perederyi, V., Nuzhniy, S., & Lebedenko, Y. (2024). Diagnostics of the state and prediction of the residual resource of parts in extreme operating conditions. *Advances in Mechanical Engineering and Transport, 2*, 18–26. https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1521
8. Duan, Y., Cao, X., Zhao, J., Li, M., & Yang, X. (2023). A spatiotemporal fusion autoencoder-based health indicator automatic construction method for rotating machinery considering vibration signal expression. *IEEE Sensors Journal, 23*, 24822–24838. https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3309013

9. Lee, S. B., Stone, G. C., Antonino-Daviu, J., Gyftakis, K. N., Strangas, E. G., Maussion, P., & Platero, C. A. (2020). Condition monitoring of industrial electric machines: State of the art and future challenges. *IEEE Industrial Electronics Magazine, 14*, 158–167. https://doi.org/10.1109/MIE.2020.3016138
10. Kumar, A., Sathujoda, P., & Bhalla, N. A. (2022). Vibration signal analysis of a rotor-bearing system through wavelet transform and empirical mode decomposition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1248*, 012027. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1248/1/012027
11. Popescu, T. D., Aiordachioaie, D., & Culea-Florescu, A. (2022). Basic tools for vibration analysis with applications to predictive maintenance of rotating machines: An overview. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118*, 2883–2899. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07703-1
12. Dos Santos Pedotti, L. A., Zago, R. M., & Fruett, F. (2017). Fault diagnostics in rotary machines through spectral vibration analysis using low-cost MEMS devices. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 20*(6), 39–44. https://doi.org/10.1109/MIM.2017.8121950
13. Hrinchenko, H., Antonenko, N., Tarasov, I., Trokhymenko, G., Magas, N., & Sarzhynskyi, S. (2024). Engineering management of energy utilities for sustainable development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1429*, 012017. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012017
14. Gangsar, P., & Tiwari, R. (2014). Multiclass fault taxonomy in rolling bearings at interpolated and extrapolated speeds based on time domain vibration data by SVM algorithms. *Journal of Failure Analysis and Prevention, 14*, 826–837. https://doi.org/10.1007/s11668-014-9893-4
15. Tian, J., Morillo, C., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2016). Motor bearing fault detection using spectral kurtosis-based feature extraction coupled with k-nearest neighbor distance analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63*(3), 1793–1803. https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2509913
16. Djebala, A., Ouelaa, N., Benchaabane, C., et al. (2012). Application of the wavelet multi-resolution analysis and Hilbert transform for the prediction of gear tooth defects. *Meccanica, 47*, 1601–1612. https://doi.org/10.1007/s11012-012-9538-1
17. Singh, K. M., & Sumathi, P. (2015). Vibration parameter estimation methods for ultrasonic measurement systems – A review. *IET Science, Measurement & Technology, 9*, 492–504. https://doi.org/10.1049/iet-smt.2014.0176
18. Satyam, M., Rao, V. S., & Devy, C. (2013). Cepstrum analysis: An advanced technique in vibration analysis of defects in rotating machinery. *Defence Science Journal, 44*(1), 53–60. https://doi.org/10.14429/dsj.44.4151
19. Lin, H.-C., Ye, Y.-C., Huang, B.-J., & Su, J.-L. (2016). Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast Fourier transform algorithm. *Advances in Mechanical Engineering, 8*(10). https://doi.org/10.1177/1687814016675080
20. Huang, Z., Zhu, J., Lei, J., Li, X., & Tian, F. (2021). Tool wear monitoring with vibration signals based on short-time Fourier transform and deep convolutional neural network in milling. *Mathematical Problems in Engineering, 2021*, 9976939. https://doi.org/10.1155/2021/9976939
21. Liu, Y., Jiang, Z., Haizhou, H., & Xiang, J. (2020). Asymmetric penalty sparse model based cepstrum analysis for bearing fault detections. *Applied Acoustics, 165*, 107288. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107288
22. Liao, Y., Ragai, I., Huang, Z., & Kerner, S. (2021). Manufacturing process monitoring using time-frequency representation and transfer learning of deep neural networks. *Journal of Manufacturing Processes, 68*(Part A), 231–248. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.046

# INTEGRATION OF STOCHASTIC INVENTORY MANAGEMENT MODELS INTO CLOUD SPREADSHEETS

**Babenko K.[1], Chernenko V.[2], Kostenko O.[2]**
[1]Newcastle University Business School, Newcastle upon Tyne, UK
[2]Communal Institution of Higher Education "Kremenchuk Humanitarian and Technological Academy" of the Poltava Regional Council, Kremenchuk, Ukraine

**Abstract**. This paper presents an approach to automating inventory management in educational and non-profit organizations using a lightweight microservice architecture implemented within cloud spreadsheets. The study focuses on typical inefficiencies that arise when inventory tracking is performed manually. The proposed system integrates a stochastic inventory model into the Google Workspace environment, allowing organizations to reduce transaction costs and lower the probability of stockouts without investing in commercial ERP solutions. Empirical data gathered from the Information and Educational Hub "Your Success Trajectory" (Kremenchuk) demonstrates a 95.1% reduction in administrative workload and an 88.8% decrease in material shortages.

**Keywords**: Inventory Management, Economic Order Quantity, Cloud Computing, Business Process Automation, Google Apps Script.

**Introduction**. Educational hubs and small non-profit organizations often manage material resources using simple spreadsheet tools. As Kittisak [1] emphasizes, operating without adaptive algorithms often forces small enterprises into a dilemma: either tying up capital in excess stock or facing operational bottlenecks due to severe material shortages. Similar challenges in developing resilient inventory control systems are explored by Ivan and Oetama [2], who advocate for dynamic reorder point models to stabilize supply chains under conditions of uncertainty.

**The purpose of the work.** The primary objective of this study is to design and validate an automated Decision Support System (DSS) based on Low-Code platforms. This system integrates a rigorous stochastic inventory management model into daily operations, bypassing the need for specialized software licenses or high-end IT infrastructure.

**Formulation of the problem**. For small-scale entities like the "Your Success Trajectory" hub, purchasing and maintaining commercial ERP software is simply not cost-effective. Current management practices heavily rely on manual spreadsheet entries that cannot adapt to fluctuating needs. In educational hubs, material shortages can directly disrupt the learning process, making timely procurement a critical priority. At the same time, staff members typically lack the specialized training required to navigate complex commercial supply chain software. Therefore, the new system must be highly intuitive for everyday users while preserving strict mathematical accuracy. The key challenge is to adapt classical inventory optimization models so that they can be implemented using simple low-code tools accessible to non-technical staff.

**Solving the problem**. Based on the "Zero-Cost ERP" concept—which emphasizes separating data from logic—our architecture uses Low-Code platforms for rapid and cost-effective digitalization [3]. This approach allows smaller organizations to implement advanced management models without significant corporate budgets [4].

The mathematical core of the system utilizes a modified Wilson model to determine the Economic Order Quantity (*EOQ*):

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}}. \quad (1)$$

Here, *D* denotes annual demand, *S* – ordering cost, and *H* – holding cost per unit.

To account for demand volatility, the system calculates the Safety Stock (*SS*), which acts as a buffer against stockouts during the lead time. The *SS* is calculated based on the standard deviation of demand ($\sigma$) and the desired service level:

$$SS = Z \cdot \sigma. \quad (2)$$

Here, $L$ represents the lead time, and $Z$ is the quantile of the normal distribution (standardized at 1.645 to ensure a 95% service level).

Consequently, the Reorder Point (*ROP*) is defined as the sum of the expected demand during the lead time and the safety stock:

$$ROP = (\mu \cdot L) + SS, \quad (3)$$

where $\mu$ is the average daily demand.

Given the effectiveness of the Google ecosystem for SME logistics [5] and its capacity for automated data pipelines [6], we use Google Apps Script (GAS) to automate these calculations. From a practical perspective, the implementation required only basic configuration of Google Sheets and Apps Script triggers. As demonstrated by Shchytov et al. [6], time-driven GAS triggers transform static spreadsheet data into a proactive decision-support system. If the current stock level ($Q_{cur}$) falls to or below the *ROP* ($Q_{cur} \leq ROP$), the system triggers an automated email notification via the *MailApp class*. This provides the manager with precise procurement instructions based on the calculated *EOQ*.

The experiment was conducted using historical inventory records and simulated demand fluctuations based on previous consumption patterns. The results, comparing the legacy manual workflow (Scenario *A*) with the proposed Automated DSS (Scenario *B*), are presented in Table 1.

Table 1

**Comparative analysis of performance indicators**

| Metric | Legacy Workflow | Automated DSS | Improvement |
|---|---|---|---|
| Administrative Workload (hrs/month) | 24.5 | 1.2 | -95.1% |
| Stockout incidents (units) | 18 | 2 | -88.8% |
| Average excess inventory (%) | 35% | 4% | -31.0% |
| Response time to critical level | 1-5 days | < 1 min | Near real-time |

**Conclusion**. Implementation at the "Your Success Trajectory" hub showed that cloud-based automation makes inventory models accessible for small organizations and significantly reduces administrative workload. The results indicate that the proposed architecture can stabilize inventory management under conditions of fluctuating demand. However, the study is limited to a single case study and a relatively small set of inventory items. For small organizations with limited budgets, such an approach may serve as a practical alternative to commercial ERP systems.

## References


1. Kittisak, A.: Challenges and strategies for inventory management in small and medium-sized cosmetic enterprises: A review. *International Journal of Information Technology and Computer Science Applications*. Vol. 1, № 2, pp. 30-45, (2023). https://doi.org/10.58776/ijitcsa.v1i2.30.
2. Ivan, I., Oetama, R. S.: Inventory Management System Using Economic Order Quantity And Reorder Point. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*. Vol. 8, № 4, (2024). https://doi.org/10.70609/gtech.v8i4.4780.
3. Korzachenko O. V.: LOW-CODE and NO-CODE BPMS: Modern trends in automation of business processes of the enterprise. *KNEU named after Vadym Hetman*, (2023). URL: https://ir.kneu.edu.ua/items/94ab7010-857a-45b6-9a60-ccbac72dcad8.
4. Zhengwu Shi, Junyu Dong, Yanhai Gan.: Democratizing Digital Transformation: A Multisector Study of Low-Code Adoption Patterns, Limitations, and Emerging Paradigms. *Applied Sciences*. Vol. 15, № 12, p. 6481, (2025). https://doi.org/10.3390/app15126481.
5. Mohamad Khairi Hassan, Mohd Hazri Mohd Rusli, Noor Azlina Mohd Salleh.: Development of an Order Processing System using Google Sheets and Appsheet for a Malaysian Automotive SME Factory Warehouse. *Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 20, № 3, pp. 63-81, (2023). https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i3.23901
6. Shchytov, D. M., Shchytov, O. M., Mormul, M. F.: Automation of processing and analysis of sales data on the Amazon platform using the Google Apps Script tool. *Actual issues in modern science*. № 1(43), pp. 224-241, (2026). https://doi.org/10.52058/2786-6300-2026-1(43)-224-241.

# HYBRID DSR-CRISP-GOV APPROACH TO MANAGING A RESEARCH PROJECT ON DEVELOPING A MULTI-CRITERIA ASSESSMENT MODEL FOR PUBLIC PROCUREMENT PARTICIPANTS

**Bakukha N., Khlevna Iu.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper proposes a hybrid DSR-CRISP-Gov approach to managing a research project on developing a multi-criteria assessment model for public procurement participants within e-government. The approach combines Design Science Research (DSR) as a research framework for iterative model creation and evaluation, CRISP-DM as a process model for data-intensive stages involving state register data, and authors-proposed Governance Gates as compliance checkpoints aligned with public-sector transparency and explainability requirements. The rationale for such integration is substantiated through the analysis of limitations of each framework individually. The structure of the approach and its distinctions from existing solutions are presented.

**Keywords:** Multi-Criteria Assessment, Public Procurement, Design Science Research, CRISP-DM, E-Government, Research Project Management, Governance Gates.

**Introduction.** A research project aimed at developing a multi-criteria assessment model for public procurement participants combines several heterogeneous tasks: building a scientific artifact (the assessment model itself), intensive work with heterogeneous data from state registers, and ensuring that the results comply with transparency, reproducibility, and explainability requirements imposed on e-government systems [1, 2]. Choosing an appropriate way to organize such a project is non-trivial, since existing research frameworks and process models cover only individual aspects of this problem.

**The purpose of the work** is to substantiate and describe a hybrid DSR-CRISP-Gov approach that combines the Design Science Research framework, the CRISP-DM process model, and authors-proposed Governance Gates for organizing a research project on developing a multi-criteria assessment model for public procurement participants.

**Formulation of the problem.** Design Science Research (DSR) [3, 4] is a widely recognized methodology for information systems research where the outcome is an artifact—including models, methods, or their software instantiations [4]. DSR organizes research as an iterative "build–evaluate–reflect" cycle with a clear structure from problem identification to communication of results [3]. However, DSR does not detail data-handling processes: the "design and development" stage assumes artifact creation but does not specify how to organize data collection, integration, and preparation from multiple heterogeneous sources, which is a key component of building an assessment model based on state registers.

CRISP-DM [5, 6] is a de facto standard process model for data mining projects that structures data work through six phases. However, CRISP-DM lacks a research cycle for building and evaluating a scientific artifact and does not account for public-sector regulatory constraints: transparency, explainability, and auditability requirements [1, 2].

The problem of domain adaptation of standard process models is not new. FIN-DM [10] was proposed for the financial sector as an extension of CRISP-DM, accounting for financial regulation specifics. DMME [12] was developed for engineering applications. However, for the domain of public procurement and e-government—where requirements for scientific rigor, work with state registers, and regulatory compliance converge—no such adaptations have been proposed. This motivates the need for an integrated approach that combines the capabilities of existing frameworks while accounting for domain specifics.

**Solving the problem.** The proposed DSR-CRISP-Gov approach organizes a research project on two levels: the macro level (DSR research cycle) and the micro level (CRISP-DM process model with Governance Gates checkpoints). The overall structure is presented in Fig. 1.

***DSR as the outer research framework.*** Following the model by Peffers et al. [3], the research process is organized into six stages: (1) problem identification—substantiating the need to move

from price-only to multi-criteria assessment; (2) objectives definition—formulating requirements for the assessment model; (3) design and development—building the MCDA model, selecting criteria and aggregation methods; (4) demonstration—testing the model on real data, including through a recommender system prototype as a means of validation; (5) evaluation—analyzing results against accuracy, transparency, and reproducibility criteria; (6) communication of results. The primary artifact is the multi-criteria assessment model, while the recommender system prototype serves as a means of its validation and demonstration. The iterative nature of DSR allows returning from evaluation to design for model refinement.

***CRISP-DM as the inner process model.*** The DSR stages "design" and "demonstration" involve substantial data work that DSR does not specify. CRISP-DM [5] details this through its phases: business understanding (procurement legislation requirements [11]), data understanding (Prozorro [7], registers, Dozorro [8]), data preparation (entity matching by EDRPOU codes, cleaning, normalization, decision matrix construction), modeling (applying MCDA methods: TOPSIS, AHP, PROMETHEE), evaluation (sensitivity analysis for normalization and weights), and deployment (integrating the model into a prototype for validation).

***Governance Gates.*** This is an authors-proposed component of the approach—mandatory checkpoints absent from both DSR and CRISP-DM but critical for models operating within an e-government environment. Gate A (between data preparation and modeling): verification of data completeness, consistency, and traceability of the data on which the model is built. Gate B (after obtaining model results): verification of explainability of assessment results through individual criteria contributions, reproducibility under identical input data, and versioning of rules and configuration [2, 9]. If a checkpoint is not passed, the process returns to the corresponding previous stage.

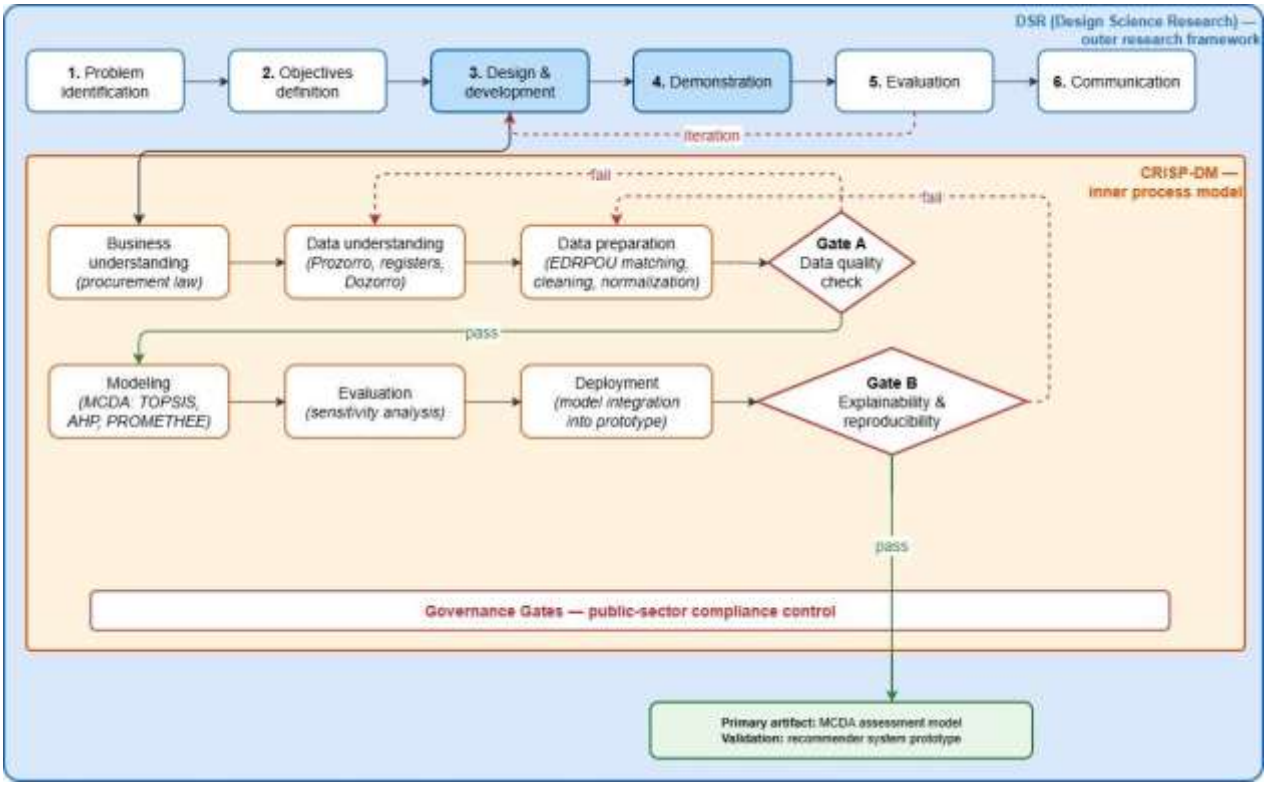



Fig. 1. Structure of the hybrid DSR-CRISP-Gov approach

Unlike existing domain adaptations of CRISP-DM—such as FIN-DM for the financial sector [10] or DMME for engineering applications [12]—which extend individual phases of the process model but do not introduce an outer research framework, the proposed approach uses DSR as the outer research cycle and CRISP-DM as the inner operational model for data work. This makes it applicable specifically in the context of scientific research whose primary outcome is a model rather than an applied data mining product. Additionally, none of the known adaptations includes built-in

compliance checkpoints for public-sector requirements, whereas in DSR-CRISP-Gov these checks (Gate A and Gate B) are an integral part of the process.

A comparative analysis (Table 1) confirms that DSR-CRISP-Gov is the only approach among those considered that simultaneously provides a research cycle for artifact creation, structured data work, regulatory compliance control, and domain adaptation to e-government specifics.

Table 1

**Comparison of approaches to research project organization**

| Characteristic | DSR | CRISP-DM | DSR-CRISP- Gov |
|---|---|---|---|
| Research cycle (artifact build-evaluate) | + | – | + |
| Structured data work | – | + | + |
| Public-sector compliance control | – | – | + |
| Domain adaptation for e-Government | – | – | + |
| Process iterativeness | + | + | + |

**Conclusion.** This paper proposes and substantiates a hybrid DSR-CRISP-Gov approach to organizing a research project on developing a multi-criteria assessment model for public procurement participants. It is shown that neither DSR nor CRISP-DM individually covers all requirements of such a project in the e-government domain: DSR does not detail data work, while CRISP-DM lacks a research cycle and does not account for public-sector regulatory constraints. The proposed approach combines these components with the addition of authors-proposed Governance Gates checkpoints. Future work involves applying the approach to building the model on real Prozorro and state register data, specifying verification criteria for Gate A and Gate B, and analyzing the effectiveness of such project organization.

## References


1. European Commission: Ethics guidelines for trustworthy AI. High-Level Expert Group on AI, (2019).
2. European Court of Auditors: Public procurement in the EU: challenges and transparency requirements. Special Report, (2021).
3. Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., Chatterjee, S.: A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, 24(3), pp. 45–77, (2007).
4. Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., Ram, S.: Design science in information systems research. MIS Quarterly, 28(1), pp. 75–105, (2004).
5. Chapman, P. et al.: CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide. SPSS Inc., (2000).
6. Schröer, C., Kruse, F., Gómez, J. M.: A systematic literature review on applying CRISP-DM process model. Procedia Computer Science, 181, pp. 526–534, (2021).
7. Ministry of Economy of Ukraine: Electronic public procurement system Prozorro. Available: https://prozorro.gov.ua/
8. Transparency International Ukraine: Dozorro. Available: https://ti-ukraine.org/en/projects/dozorro/
9. Dignum, V.: Responsible Artificial Intelligence. Springer, (2019).
10. Plotnikova, V., Dumas, M., Milani, F.: Adaptations of data mining methodologies: a systematic literature review. PeerJ Computer Science, 6, e267, (2020). DOI: 10.7717/peerj-cs.267
11. Verkhovna Rada of Ukraine: Law of Ukraine ‘On Public Procurement.’ Available: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19
12. Huber, S., Wiemer, H., Schneider, D., Ihlenfeldt, S.: DMME: Data Mining Methodology for Engineering. Journal of Manufacturing Systems, 52, pp. 233–245, (2019).

# COMPARATIVE ANALYSIS OF ATTENTION MECHANISMS AND THEIR PLACEMENT FOR SOCCER BALL DETECTION

**Bishyr S.[1], Ivasenko I.[1,2], Lapychak I.[3]**
[1]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[2] Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine
[3] Lviv State University of Physical Culture, Lviv, Ukraine.

**Abstract**. Accurate detection of the soccer ball in video footage remains a challenging task due to its small size, rapid motion, and frequent occlusion by players. Yet, it is essential for performance analysis and tactical evaluation in modern football analytics. This study examines the effectiveness of integrating attention mechanisms into a baseline Single Shot MultiBox Detector (SSD) with a VGG-16 backbone to improve ball-detection accuracy. Channel and spatial attention modules – including Squeeze-and-Excitation (SE), Coordinate Attention (CA), and Efficient Channel Attention (ECA) – were systematically applied at different network stages. The models were trained and evaluated on two public datasets of labeled professional match recordings. Comparative experiments demonstrated that attention-enhanced models achieved improvements in mean Average Precision (mAP) of up to 10.4% over the baseline detector. These results suggest that the proper selection and placement of attention modules can significantly enhance precision while maintaining computational efficiency. The findings highlight concrete guidelines for designing lightweight, attention-augmented detectors in football video analysis systems, thereby supporting more reliable event detection for coaching, scouting, and automated match reporting.

**Keywords**: Soccer Analytics, Object Detection in Sports, Convolutional Neural Networks (CNNs), Single Shot Detector (SSD), Attention modules (SE, CA, ECA), Small Object Detection.

**Introduction**. Accurate ball detection in football videos remains one of the most challenging tasks, due to the small size of the ball, fast motion, frequent occlusion, and visual similarities to other elements [1]. Specialized models such as DeepBall and FootAndBall highlight the importance of treating ball detection as a distinct problem of small-object detection [2, 3]. Nonetheless, reliable ball localization is essential for football analysis tasks, such as event detection and tactical analysis. Modern object detectors perform well on large, stable objects but show significantly lower performance on small, fast-moving objects such as a soccer ball [2-4]. In practice, the accuracy of ball detection is significantly lower than for player detection. Lightweight attention modules, such as Squeeze-and-Excitation (SE), Efficient Channel Attention (ECA), and Coordinate Attention (CA), are well-known mechanisms for improving feature representation in convolutional neural networks [5-7]. In our previous work, we demonstrated that the attention modules integrated into a feature pyramid network (FPN) improve ball detection performance in football video [8]. Meanwhile, the studies in other domains indicate that the effectiveness of the attention modules depends on their placement in the network architecture [9]. Motivated by these findings, this work investigates both the type of attention mechanism and its placement in an SSD300-VGG16 detector for soccer ball detection.

**The purpose of the work** is to perform a controlled comparative analysis of lightweight attention mechanisms and their placement within an SSD300-VGG16 architecture for soccer ball detection.

**Formulation of the problem**. Current object detectors show limited performance for soccer ball detection, and the impact of different attention mechanisms and their placement within the network is not well understood.

**Solving the problem**. To address the task of soccer ball detection, we extend the SSD300-VGG16 detector with the lightweight attention blocks [10, 11]. We used three different attention mechanisms – SE, ECA, and CA [5-7]. We tested it at different locations within the model, including the backbone, transition layer, and detection heads (see Fig. 1). The proposed design enables a controlled comparison of the two attention types and their placement under identical training and evaluation conditions.

The integration of attention blocks at various stages is motivated by the hierarchical structure of the SSD architecture, where the backbone layers provide high-resolution features that contain fine spatial details, whilst deeper layers preserve more abstract semantic information.

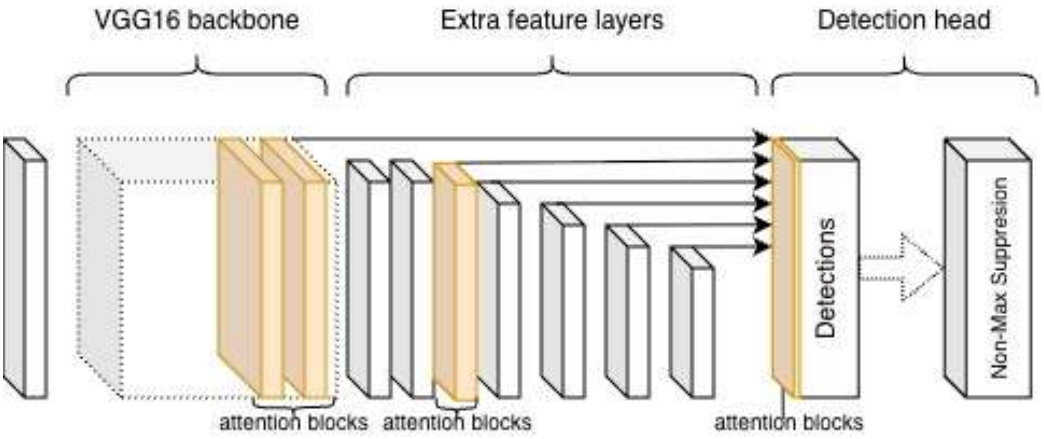



Fig. 2. Attention module placement in SSD300-VGG16

The VGG16 baseline model is initialized with pretrained weights and trained on two public datasets using data augmentation, optimization settings, and the Smooth L1 loss function (1), (2) [12]. For evaluation, the VOC-style mAP and Recall at IoU=0.5 are used, which allows a consistent comparison across all configurations [13].

$$l(x, y) = L = l_1, \cdots, l_N^T, \tag{1}$$

$$l_n = f(x) = \begin{cases} 0.5 * \left(x_n - y_n\right)^2 / \beta, & |x_n - y_n| < \beta, \\ \left|x_n - y_n\right| - 0.5 * \beta, & |x_n - y_n| \geq \beta. \end{cases} \tag{2}$$

The results represented in Table 1 demonstrate that all attention-enhanced models outperform the baseline detector, confirming the effectiveness of attention mechanisms for this task. The best mAP performance is achieved by the ECA module inserted into the backbone layers. At the same time, the highest Recall is obtained with the SE module at the same placement. This indicates that enhancing early and mid-level layers is most beneficial for improving detection performance, with different attention mechanisms offering a trade-off between precision and sensitivity.

Table 2

**Results of the SSD300 VGG16 model with different types and placements of attention blocks**

| Model | mAP | Recall |
|---|---|---|
| **ECA backbone** | 0.9101 | 0.9419 |
| **SE backbone** | 0.8711 | 0.9647 |
| **ECA transition** | 0.8663 | 0.9036 |
| **SE transition** | 0.8621 | 0.9405 |
| **ECA head** | 0.8616 | 0.9186 |
| **CA backbone** | 0.8605 | 0.9091 |
| **CA head** | 0.8604 | 0.9419 |
| **SE head** | 0.8503 | 0.9070 |
| **CA transition** | 0.8331 | 0.9195 |
| **Baseline model** | 0.8063 | 0.8810 |

**Conclusion**. In this work, we investigated the effects of lightweight attention mechanisms and their placement within an SSD300-VGG16 detector for soccer ball detection, focusing on three widely used modules – SE, ECA, and CA – integrated in the backbone, transition layer, and detection heads.

The experimental results confirmed that incorporating attention layers into the detection model improves detection performance. Among the evaluated models, the ECA applied to the backbone achieves the highest mAP, while the same placement of the SE attention type provides the highest Recall. These findings indicate that attention can effectively enhance small-object detection, particularly for soccer balls, while also revealing a precision-recall trade-off that depends on the attention type.

A key outcome is the importance of attention placement within the network architecture. The results demonstrate that attention applied to early and mid-level layers in the backbone, which preserve fine details, is more effective than attention to transition or detection head layers.

## References


1. Moreira, C., Ferreira, L., Coelho, P. J.: A comprehensive review of ball detection techniques in sports. PeerJ Computer Science 11, e3079 (2025). https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3079.
2. Komorowski, J., Kurzejamski, G., Sarwas, G.: DeepBall: Deep Neural-Network Ball Detector. In: Proceedings of the 14th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), pp. 297–304 (2019). https://doi.org/10.5220/0007348902970304.
3. Komorowski, J., Kurzejamski, G., Sarwas, G.: FootAndBall: Integrated Player and Ball Detector. In: Proceedings of the 15th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP), pp. 47–56 (2020). https://doi.org/10.5220/0008916000470056.
4. Begmatov, S., Arabboev, M., Rikhsivoev, M., Saydiakbarov, S., Khamidjonov, Z., Vakhkhobov, S., Aliyarov, K., Karimov, O.: Ball and Player Detection in Futsal Videos Using YOLOv8 Model. In: Proceedings of the 29th International Conference Information Society and University Studies (IVUS 2024), CEUR Workshop Proceedings, vol. 3885, pp. 259–269 (2024).
5. Hu, J., Shen, L., Sun, G.: Squeeze-and-Excitation Networks. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 7132–7141 (2018).
6. Wang, Q., Wu, B., Zhu, P., Li, P., Zuo, W., Hu, Q.: ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 11534–11542 (2020).
7. Hou, Q., Zhou, D., Feng, J.: Coordinate Attention for Efficient Mobile Network Design. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 13708–13717 (2021). https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.01350.
8. Ivasenko, I. B., Bishyr, S. S.: Enhancing ball detection in football videos using attention mechanisms in FPN-based CNNs. Problems in Programming (2), pp. 54–62 (2025). https://doi.org/10.15407/pp2025.02.054.
9. Oh, M., Oh, S., Im, J., Kim, M., Kim, J. S., Park, J. Y., Yi, N. R., Bae, S. H.: Comparative Analysis of Attention Mechanisms in Densely Connected Network for Network Traffic Prediction. Signals 6(2), 29 (2025). https://doi.org/10.3390/signals6020029.
10. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., Berg, A. C.: SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: Computer Vision – ECCV 2016, Lecture Notes in Computer Science, vol. 9905, pp. 21–37. Springer, Cham (2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2.
11. Simonyan, K., Zisserman, A.: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. arXiv:1409.1556 (2015). https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556.
12. Girshick, R.: Fast R-CNN. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 1440–1448 (2015). https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.169.
13. Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., Zisserman, A.: The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge. International Journal of Computer Vision 88(2), 303–338 (2010). https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4.

# ANALYSIS OF RISKS AND FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF IT PLATFORM DEVELOPMENT PROJECTS

**Bushuyev S.[1], Timinskyi O.[2], Liashenko D.[2], Yurechko A.[2]**
[1]Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
[2]Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper addresses the problem of integrated analysis of risks and performance factors in complex IT platform development projects. The object of the study is the management processes of complex IT projects, while the subject is the approaches to the formalisation and analysis of risks and performance factors within the project life cycle. The aim of the study is to substantiate a classification-analytical approach to risk formalisation and to analyse performance factors affecting platform operation. The research applies methods of structural analysis, classification, formalisation, and generalisation. An approach is proposed in which risks are described through quantitative parameters and classification attributes, enabling their structuring and aggregation across life cycle phases. It is shown that performance factors may influence risk parameters, including probability, impact, and weight. The results consist in the development of an integrated approach to the analysis of risks and performance factors, which can be applied to support managerial decision-making in IT platform development projects, particularly in digital commerce, headless content management systems (CMS), and multi-channel content distribution.

**Keywords:** IT platform, project management, project risks, performance factors, life cycle, classification-analytical approach, digital commerce, Headless CMS, content distribution.

**Introduction.** Modern IT platforms are complex multi-component systems that integrate software modules, data, services, application programming interfaces (APIs), and external integrations. Under such conditions, project performance is determined not only by implementation quality but also by the team's ability to analyse risks, consider performance factors, and make informed decisions at different phases of the life cycle. This approach is consistent with the principles outlined in ISO/IEC/IEEE 12207:2017 [4].

This is particularly relevant for digital commerce platforms, headless content management systems (CMS), and content-oriented systems, which are characterised by integration complexity, dependence on external services, and high scalability requirements. At the same time, in IT project management practice, risks and performance factors are often analysed separately, which complicates the development of an integrated decision-making model. Therefore, their joint consideration within the project life cycle is appropriate [3].

In previous studies, the authors proposed domain-oriented life cycle models for IT projects, including a risk-oriented model for e-commerce platforms and an architecture-oriented model for content-oriented systems [1]. This paper further develops these approaches in two interrelated but conceptually distinct directions: on the one hand, by forming a classification-analytical approach to the description and formalisation of risks in digital commerce IT projects; on the other, by analysing the factors that influence platform operation and performance.

**The purpose of the work** is to substantiate a classification-analytical approach to the description and formalisation of risks in IT platform development projects, as well as to analyse performance factors affecting the operation of IT platforms within the life cycle.

**Formulation of the Problem.** In complex IT platform development projects, risks and performance factors are often analysed separately, although both groups—risks and performance factors—affect timelines, budget, quality, scalability, integration capability, and system stability. In modern project management, risk is considered a factor of uncertainty that requires monitoring and managerial response [2].

At the same time, integration complexity, unclear architecture, or an unformalised content model may simultaneously reduce platform performance and increase the level of project risks. This necessitates the integrated consideration of risks, performance factors, and life cycle phases of IT projects within a formalised analytical approach [4].

**Solving the Problem.** Risks in IT platform development projects are heterogeneous and may arise at technical, integration, organisational, business, security, and operational levels. Their occurrence is associated with both internal project factors and the external environment, including

changing requirements, dependence on third-party services, regulatory constraints, and infrastructure instability. This approach is consistent with the understanding of risk as a consequence of uncertainty affecting the achievement of project objectives [3].

For further analysis, it is appropriate to consider complex IT platforms in which software architecture is directly linked to business processes, data, content, and external integrations. In particular, digital commerce platforms, headless content management systems (CMS), and multi-channel information systems are characterised by high integration dependency. As a result, risks manifest not only at the level of software code but also at the levels of architecture, application programming interfaces (APIs), content processes, security, and operation.

As shown in the risk-oriented life cycle model of e-commerce IT projects [1], the set of project risks can be represented as $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$. In this study, an extended approach to risk description is proposed, according to which each risk $r_i \in R$ is characterised by two groups of attributes: quantitative parameters and classification attributes. Formally, this can be expressed as $r_i = (\alpha_i, \phi_i)$, where $\alpha_i = (P_i, I_i, w_i)$ is the vector of quantitative risk parameters, including the probability of occurrence $P_i$, the impact estimate $I_i$ and the weighting coefficient $w_i$, which reflects the relative importance of the risk. The set $\phi_i = (s_i, l_i, o_i)$ represents classification attributes that define the risk source $s_i$, the life cycle phase in which it occurs $l_i$ and the object of impact $o_i$.

Classification attributes are categorical in nature and are not used directly in calculations; however, they serve to structure the set of risks. In particular, they enable the formation of risk subsets based on specific attributes, which is a necessary condition for their further aggregation and analysis.

The selection of three classification attributes is determined by the need to ensure a minimally sufficient level of detail. The risk source attribute captures the nature of the risk, the life cycle phase attribute reflects its temporal aspect, and the object of impact attribute indicates the direction of its influence on the system. The combination of these attributes provides a multidimensional representation of risks without unnecessary model complexity.

Therefore, the proposed classification model enables the transition from an unstructured description of risks to their formalised representation, in which each risk has a unified structure and can be used in subsequent procedures of quantitative assessment and decision support. This approach is consistent with the principles of software risk management, which include risk identification, analysis, prioritisation, and control [5], and provides a basis for their further aggregation within the project life cycle.

In addition to risks, factors influencing the operation and performance of complex IT platforms play an important role. The performance of an IT platform is determined by factors affecting its scalability, integration capability, operational stability, support of business processes, and adaptability to change.

For content-oriented platforms, structured content management, reuse of content components, localisation, and publication control are also important. Generalised groups of such factors are presented in Table 1.

Table 1

**Classification of Performance Factors of IT Platforms**

| Factor Group | Description |
|---|---|
| Architectural | modularity, scalability |
| Content-related | content model, reuse, localisation |
| Channel-related | channel adaptation and synchronisation |
| Integration | CRM, PIM, ERP, analytics |
| Organisational | roles, workflow, change control |
| Technical | APIs, caching, CDN |
| Analytical | metrics and channel analysis |

Performance factors can be represented as a set $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, where $F$ denotes the set of performance factors of an IT platform. Each factor can be described by a group, a platform attribute, and the strength of its influence: $f_j = (G_j, A_j, I_j)$, where $G_j$ is the factor group, $A_j$ is the

platform attribute or characteristic affected by the factor, and $I_j$ is the intensity or significance of the impact.

For the generalised assessment of specific platform aspects, an integral indicator may be used:

$$E = \sum_{j=1}^{m} a_j \cdot e_j, \quad (1)$$

where $E$ is the integral performance measure, $a_j$ is the weighting coefficient of the factor, and $e_j$ is the evaluation of the state or level of implementation of the corresponding factor.

This formalisation enables the quantitative assessment of the influence of performance factors and may be used to account for their impact on project risk parameters.

Risks and performance factors are interrelated: proper implementation of these factors may reduce the level of risks, whereas insufficient control may increase them. For example, integration complexity increases the probability of technical failures, unclear architecture complicates scalability, a non-formalised content model increases the risk of publication errors, and insufficient analytics reduces the soundness of managerial decisions.

In further analysis, risks are considered within the context of a risk-oriented life cycle model of e-commerce IT projects. Within this model, risks are analysed across individual life cycle phases. In particular, for each phase $l \in L$, a subset of risks is defined as $R_l = \{r_i \in R \mid l_i = l\}$, which includes all risks relevant to the given phase.

The integral indicator of risk impact for the phase $l$ is then defined as the aggregated assessment of the risks belonging to this subset:

$$RE_l = \sum_{r_i \in R_l} w_i \cdot P_i \cdot I_i \,. \quad (2)$$

In this model, the indicator $RE_l$ is used as a quantitative measure of the project's risk load within the corresponding life cycle phase and may be applied to support managerial decisions regarding transitions between phases.

The relationship between performance factors and risks lies in the fact that these factors may influence the values of $P_i$, $I_i$ або $w_i$. For example, higher architectural maturity may reduce the probability of technical risks, a formalised content model may decrease the risk of publication errors, and the criticality of a specific integration may increase the weight of the corresponding risk.

The general logic of the approach can be represented as the sequence $F \rightarrow \alpha_i \rightarrow RE_l \rightarrow D_l$, where $F$ is the set of performance factors, $\alpha_i$ denotes the quantitative risk parameters, $RE_l$ is the integral indicator of risk impact for a given phase, and $D_l$ represents the managerial decision for the corresponding life cycle phase. This sequence reflects the influence of performance factors on risk parameters and their subsequent use in the decision-making process.

For decision-making, a threshold value of acceptable risk may be applied: $RE_l \leq RE_l^{max}$, where $RE_l^{max}$ is the acceptable risk threshold for the corresponding life cycle phase. If this condition is satisfied, the project may proceed to the next phase; otherwise, corrective actions are required, including refinement of requirements, revision of architecture, reduction of integration complexity, enhancement of security, or adjustment of the resource plan.

Thus, within the proposed approach, performance factors and risks are considered as interrelated elements used to support managerial decision-making at different phases of the project life cycle (Fig. 1).

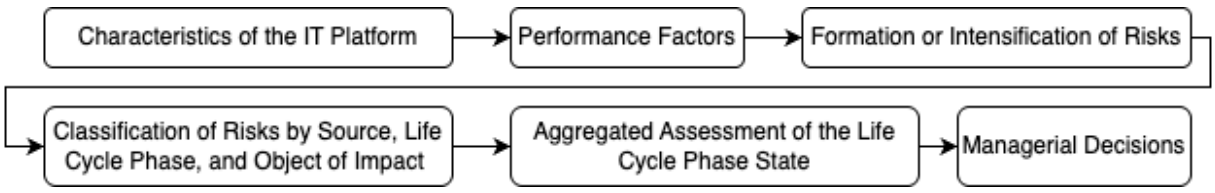



Fig. 1. Scheme of the relationship between risks and performance factors

A similar principle of indicator aggregation is also applied within the architecture-oriented life cycle model of IT projects for the development of content-oriented systems, where the aggregate assessment is formed based on architectural characteristics and platform performance factors. In this context, the aggregation process allows for a consistent evaluation of platform states across different life cycle phases, taking into account both structural and functional aspects of the system.

This approach can be applied to various types of complex IT platforms, including digital commerce platforms, headless content management systems (CMS), and multi-channel content distribution systems, as they are characterised by integration complexity, the significant role of data and content, and the need for controlled progression through life cycle phases. These characteristics determine the necessity of coordinated consideration of architectural features, performance factors, and risk parameters to ensure stable platform operation and effective project implementation.

**Conclusions.** This paper substantiates the relevance of the integrated consideration of risks and performance factors in IT platform development projects within the context of their life cycle. A classification-analytical approach to risk formalisation is proposed, enabling the structuring of risks based on quantitative parameters and classification attributes and their further aggregation across life cycle phases. This provides a consistent analytical framework for evaluating risks at different stages of project implementation.

It is shown that platform performance factors may influence risk parameters, including probability, impact, and weight, thereby ensuring their integrated consideration in managerial decision-making. This relationship supports a more comprehensive understanding of project dynamics and contributes to improving the effectiveness and controllability of IT platform development projects.

The scientific novelty of this work lies in the development of a classification-analytical approach to the formalisation of risks in IT projects, which describes risks through a combination of quantitative parameters and classification attributes with the possibility of aggregation across life cycle phases, as well as in accounting for the influence of performance factors on risk parameters.

The practical significance of the approach lies in its applicability to project state assessment, identification of critical areas, prioritisation of managerial actions, and support of decision-making during the planning, development, implementation, and operation of complex IT platforms.

Future research directions are associated with:

- the development of a mathematical model for assessing the impact of risks on performance indicators of IT projects, particularly in the context of digital commerce platforms;
- the refinement and formalisation of relationships between performance factors and risk parameters within IT project life cycle models;
- the extension of the approach to various types of digital platforms, including consideration of the architectural features of headless content management systems (CMS).

## References


1. Yurechko, A., Liashenko D., & Timinskyi, O. (2026). Analysis of IT project life cycle models in the fields of e-commerce and content-oriented system development. Management of Development of Complex Systems, 65, 97–106, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2026.65.97-106.
2. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) and The Standard for Project Management. 7th ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2021.
3. ISO. ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
4. ISO/IEC/IEEE. ISO/IEC/IEEE 12207:2017. Systems and software engineering — Software life cycle processes. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
5. Boehm B. W. Software Risk Management: Principles and Practices. IEEE Software. 1991. Vol. 8, No. 1. P. 32–41.

# EFFECTIVENESS OF DIGITAL MARKETING TOOLS IN THE CONTEXT OF MANAGING THE STRATEGIC DEVELOPMENT OF BUSINESS SYSTEMS

**Chobitok V., Hil B.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The study examines the main digital marketing tools and conducts a comparative analysis of their advantages and disadvantages in the context of managing the strategic development of business systems. The strategic priority of short-form video marketing as a digital marketing tool with the highest ratio of audience reach to costs is substantiated based on the analysis of TikTok, Instagram Reels and YouTube Shorts platforms by demographic characteristics. Practical recommendations for selecting an effective platform depending on the target audience are proposed.

**Keywords:** digital marketing tools, short-form video marketing, SMM, organic reach, business systems, target audience, management, strategy, development.

**Introduction.** In the context of global economic turbulence intensified by military conflicts, rising energy prices and supply chain instability, small and medium-sized businesses (SMBs) operating in Ukraine are increasingly faced with the need to make informed choices regarding digital marketing tools that would allow them to expand market reach without proportionally increasing marketing costs. Under these conditions, digital marketing is no longer merely an auxiliary promotion channel but transforms into a component of effective strategic development management that affects customer communication, demand generation, competitiveness support and adaptation of the business system to changes in both its internal and external environment.

The question of the effective use of digital marketing tools for SMBs is particularly important in Ukraine, as they account for a significant share of the country's GDP. Yet even amid active global digitalization processes, Ukrainian small and medium-sized business systems do not pay sufficient attention to the selection of digital marketing tools in the context of managing their strategic development. 98% of domestic business systems have their own website, 11% have a structured digital marketing strategy, and only 7% have a separate SMM strategy, which confirms the relevance of this study.

**The purpose of the work** is to determine the effectiveness of digital marketing tools in the context of managing the strategic development of business systems.

**Formulation of the problem.** To achieve the stated goal, the following tasks are addressed: systematization of the main digital marketing tools and comparative assessment of their effectiveness for business systems with limited financial resources; analysis of short-form video platforms TikTok, Instagram Reels and YouTube Shorts across demographic segments; development of practical recommendations for selecting marketing platforms depending on the target audience.

**Solving the problem.** Modern digital marketing encompasses a wide range of tools, from search engine optimization and content marketing to video marketing and social media marketing. Each is characterized by its own performance indicators, cost level and specifics of interaction with the target audience [2]. Under conditions of limited resource potential of SMBs, the choice among digital marketing tools acquires strategic significance, as the scale of market reach and the return on marketing investments directly depend on it. A comparative characterization of current digital marketing tools is presented in Table 1.

Based on the comparative analysis, it can be concluded that short-form video marketing holds a key advantage over other current digital marketing tools. Algorithmic reach allows SMBs to compete for consumer attention without direct advertising expenditure on reach.

According to HubSpot (2025), 21% of professionals consider short-form video marketing to be the tool with the highest return on marketing investment (ROI) among existing instruments [3]. Additionally, short-form advertising outperforms static ads in ROI by 1.6 times [6]. To understand the effectiveness of digital marketing tools in the context of managing the strategic development of business systems, it is necessary to examine the operating principle of this tool.

Table 1

**Comparative characteristics of current digital marketing tools**

| Tool | Description | Advantages | Disadvantages |
|---|---|---|---|
| SEO | Website optimization to improve visibility in search engines | Free organic traffic; long-term position stability | Slow results (3-12 months); algorithm dependency |
| Content marketing | Creation and distribution of useful content to attract and retain the target audience | Builds brand authority; supports SEO; high audience trust | Significant time investment; delayed ROI |
| Email marketing | Sending personalized messages to a subscriber base to maintain communication and stimulate sales | High personalization | Depends on database quality; high probability that the email will go unread |
| SMM marketing | Systematic brand presence on social media through organic publications and audience interaction | Wide reach; direct dialogue with audience | Requires constant management |
| Short-form video marketing | Publishing short videos on TikTok, Reels and YouTube Shorts for organic reach through recommendation algorithms | Algorithmic reach without follower dependency; organic reach without direct advertising costs | Requires creative resources; trend sensitivity |

Source: compiled based on [2, 3, 4, 5, 6, 7]

Unlike most marketing tools, where reach is directly dependent on the advertising budget or the number of followers, short-form video marketing platforms promote content based on audience behavioral signals: watch time, repeat views, likes and shares.

The most popular platforms for publishing short-form video marketing content are TikTok, Instagram Reels and YouTube Shorts (Table 2).

Table 2

**Comparative characteristics of short-form video content platforms**

| Platform | Target audience age |
|---|---|
| TikTok | Under 24 – 63%; growing audience aged 25-34 |
| Instagram Reels | 18-24 years – 29,5%; 25-34 years – 32% |
| YouTube Shorts | Widest range – 18-49 years |

Source: compiled based on [8, 9, 10, 11]

The results of the analysis indicate a clear audience distribution across platforms. TikTok is oriented primarily toward the under-24 segment (63%), although the 25-34 age group also shows steady growth. Instagram Reels covers a somewhat older and more commercially attractive group: 25-34 year-olds (32%) and 18-24 year-olds (29.5%) [8, 9]. YouTube Shorts has the widest demographic range – from 18 to 49 years – and is also the leader in social media reach in Ukraine [11, 12].

Thus, the effectiveness of short-form video marketing in the context of managing the strategic development of business systems lies in the ability to rationally select the platform that corresponds to the age profile of the target audience and the financial and resource potential of the SMB.

**Conclusion.** The study demonstrates that the effective use of digital marketing tools is a necessary condition for managing the strategic development of business systems. Among the digital marketing tools examined, short-form video marketing stands out for its unique advantage – the ability to ensure broad organic-demographic reach without direct advertising costs – which makes it a priority tool for SMB development. The choice of a specific short-form video marketing platform should be based on an analysis of the target audience's age profile.

## References


1. Mostova A., Batsenko L., Arakelova I., Halenin R., Klietsova N., Baranova V., Krasovska A. Digital marketing management in Ukrainian SMEs: Tools, barriers and strategic readiness for transformation. Innovative Marketing, 22(2), 55-70, (2026). https://doi.org/10.21511/im.22(2).2026.05.
2. Kulyniak I., Holovetskyi D. Digital Tools of Marketing Management of Enterprises: Role, Advantages and Challenges of Use. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Seriia «Problemy ekonomiky ta upravlinnia», 7(2), 114-124, (2023). https://doi.org/10.23939/semi2023.02.
3. HubSpot. State of Marketing Report 2025. HubSpot Inc., (2025). https://www.hubspot.com/state-of-marketing
4. Litmus. State of Email 2025. Litmus Software Inc., (2025). https://www.litmus.com/state-of-email-reports
5. Hootsuite. Social Media Trends 2026. Hootsuite Inc., (2026). https://www.hootsuite.com/research/social-trends.
6. Wyzowl. Video Marketing Statistics 2026. Wyzowl Ltd., (2026). https://www.wyzowl.com/video-marketing-statistics/.
7. Manic M. Short-Form Video Content and Consumer Engagement in Digital Landscapes. Bulletin of the Transilvania University of Brașov. Series V: Economic Sciences, Vol. 17(66), No. 1, pp. 45-52, (2024). https://doi.org/10.31926/but.es.2024.17.66.1.4
8. Yanchuk T., Romanova M. The Role of Video Content in Digital Marketing: Analysis of the Efficiency of Short Videos Using the Examples of TikTok, Instagram Reels and YouTube Shorts. Ekonomika ta suspilstvo, No. 70, (2024). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-50.
9. Bobrovnyk V., Samartseva A. Marketing Approaches to Managing Audience Engagement in Vertical Video Content on TikTok and Instagram. Ekonomika ta suspilstvo, No. 83, (2026). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-83-161
10. Sprout Social. Social Media Demographics to Inform Your 2026 Strategy. Sprout Social Inc., (2026). https://sproutsocial.com/insights/new-social-media-demographics/.
11. Pew Research Center. Americans' Social Media Use 2025. Pew Research Center, (2025). https://www.pewresearch.org/internet/2025/11/20/americans-social-media-use-2025/.
12. DataReportal. Digital 2025: Ukraine. DataReportal, (2025). https://datareportal.com/reports/digital-2025-ukraine.
13. Gradus Research. Media Consumption in Ukraine 2025. Kyiv: Gradus, (2025). https://gradus.app/en/open-reports/research-media-consumption-ukraine/.

# CLASSIC OPTIMISATION PROBLEMS AS THE BASIS FOR RESOURCE ALLOCATION IN A MANUFACTURING ENTERPRISE

**Chyzhmotria M.O.**[1], **Chyzhmotria O.V.**[1,2], **Vakaliuk T.A.**[1,2,3,4]
[1]Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine
[2]Institute for Digitalisation of Education of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]Kryvyi Rih State Pedagogical University, Kryvyi Rih, Ukraine
[4]Academy of Cognitive and Natural Sciences, Kryvyi Rih, Ukraine

**Introduction**. Modern manufacturing enterprises operate in an environment of fierce competition, rapid technological change, and limited resources, which necessitates improving the effectiveness of management decisions. One of the key factors in ensuring competitiveness is the rational and optimal allocation of production resources, including material, labour, financial, and time resources. The extent to which the process of utilising these resources is effectively organised determines not only the enterprise's productivity but also its ability to adapt to changes in the external environment.

**This work aims** to review existing methods and algorithms for solving a modified resource-allocation problem in a manufacturing enterprise.

**Problem formulation**. Economic-mathematical modelling involves applying mathematical methods and models to study economic processes and phenomena. The main objective of this approach is to formalise and quantify economic relationships, enabling the forecasting of future developments and the making of informed decisions. The development of such methods began as early as the first half of the 20th century, and they have become widely used in macroeconomic management, business planning and financial analysis.

**Solving the problem**. One of the leading tools of economic-mathematical modelling is linear programming, which optimises resource use subject to constraints. Linear programming (LP) is a branch of mathematics that deals with methods for solving optimisation problems with a linear objective function and linear constraints on the variables [1]. In turn, non-linear programming allows for the consideration of more complex economic relationships that cannot be interpreted linearly. Furthermore, statistical methods play a key role in data analysis and the creation of models that account for random variations and uncertainty [2].

Let us consider examples of basic optimisation problems. *The raw material utilisation problem* is an important aspect of production management, involving the optimal allocation of limited resources to maximise profit or minimise costs. In this problem, a firm has a fixed quantity of raw materials to use in manufacturing various products. Each product has its own raw material requirements and also generates a certain profit or has a certain value. The main objective of the problem is to determine how many units of each product should be manufactured to make the best use of the available raw materials, whilst adhering to constraints such as the maximum amount of raw materials that can be used or limitations on production capacity. The problem may involve various factors, such as production costs, market prices for finished products, and possible restrictions on the number of units produced. The raw material utilisation problem can be formulated as a linear programming problem, where the objective function maximises profit, and the constraints account for the available quantity of raw materials and other production constraints. Solving this problem enables enterprises to plan production effectively, reduce costs, and enhance market competitiveness. The application of methods such as the simplex method or dynamic programming helps find optimal solutions to the raw material utilisation problem, which, in turn, contributes to more efficient resource management [3].

Another prominent example of optimisation problems is the *knapsack problem*. The essence of the problem lies in optimising the selection of items to fill a rucksack with limited capacity, thereby maximising the total value of the selected items. The rucksack has a specific maximum capacity (weight) that cannot be exceeded, and each item has its own weight and value. The problem

aims to select a specific combination of items that does not exceed the rucksack's capacity, whilst maximising the total value. There are several variants of the knapsack problem, including the 0/1 knapsack, where each item can be taken or left out; the weighted knapsack, in which items have different weights; and the objective is to maximise value within a limited total weight, as well as the fractional knapsack problem, where it is permitted to take fractions of items, making the problem more flexible. The knapsack problem has numerous practical applications, including resource optimisation in manufacturing, financial planning (investment selection), logistics (cargo packing) and the allocation of scarce resources across various sectors. In general, the knapsack problem is a classic example of combinatorial optimisation, and its solution can be found using various algorithms, such as dynamic programming, greedy algorithms or brute-force methods [4].

*The meal planning problem* involves developing a balanced menu that meets the nutritional needs of an individual or a group within limited resources. The main objective of this problem is to determine the optimal combination of foods that will provide the necessary nutrients, vitamins, and minerals, whilst minimising costs or maximising the enjoyment of the meal. The diet planning problem takes into account various factors, such as the nutritional value of foods, their cost, and individual requirements for calories and nutrients, which may vary depending on age, gender, level of physical activity, and state of health. The problem can be formulated as a linear programming problem to minimise food costs, subject to constraints that account for the required nutrient intake standards. This problem can be solved using various methods, such as the simplex method, dynamic programming or greedy algorithms. The application of such methods enables the development of effective diets that meet the requirements of healthy eating while accounting for financial constraints. The problem of diet planning has numerous practical applications in dietetics, the food industry, catering establishments and personal nutrition. An effective solution to this problem contributes to improved health, a better quality of life and optimised food expenditure [5].

The main objective of the *material-cutting optimisation problem* is to determine the best way to cut a large piece of material into smaller parts to minimise waste and maximise the use of raw materials, whilst meeting the requirements for the dimensions and shapes of the finished products. The optimal material cutting problem takes into account various factors, such as the dimensions and quantity of required parts, material characteristics, and possible cutting constraints, for example, technological features or equipment limitations. The problem can be formulated as a combinatorial optimisation problem, with the objective of minimising waste or maximising material utilisation. This problem can be solved using various methods, such as dynamic programming, greedy algorithms, or heuristic approaches. The application of such methods enables companies to reduce raw material costs, improve production efficiency, and minimise their environmental impact by reducing waste. The problem of optimal material cutting is relevant in many sectors, including the textile, furniture, metallurgical and construction industries, where the efficient use of materials has a significant impact on overall production profitability [6].

*The travelling salesman problem* is a classic combinatorial optimisation problem that involves finding the shortest route for a travelling salesman who must visit a given number of cities and return to the starting point. The main objective of this problem is to determine the optimal order of visiting cities to minimise the total distance or travel costs. The travelling salesman problem accounts for various factors, such as distances between cities, possible routes, and time or resource constraints that may influence the choice of route. The problem can be formulated as a graph problem, where cities correspond to vertices and the distances between them to edges. Solving the travelling salesman problem is complex, as the number of possible routes grows exponentially with the number of cities, making it NP-hard. Various methods are used to solve this problem, such as greedy algorithms, dynamic programming, genetic algorithms and heuristic approaches. The travelling salesman problem has numerous practical applications in logistics, route planning, supply chain management and other fields where it is important to optimise movement between different points. Effectively solving this problem allows for reduced transport costs, improved customer service, and increased overall efficiency of business processes [7].

*The transport problem* is a classic linear programming problem that optimises the process of transporting goods from several supply sources to several consumption points to minimise total transport costs. The main objective of this problem is to determine the optimal allocation of goods between suppliers and consumers, taking into account constraints on the quantity that can be delivered from each supplier, as well as each consumer's needs. The transport problem takes into account various factors, such as transport costs between each pair of supplier and consumer, the volumes of goods to be transported, and supply and demand constraints. The problem can be represented as a matrix, where the rows correspond to suppliers and the columns to consumers, and the matrix elements reflect transport costs. The solution to the transport problem can be found using various methods, such as the south-west corner method, the potential method, or the modification method. These methods enable the efficient identification of optimal solutions that minimise transport costs. The transport problem has numerous practical applications in logistics, supply chain management, production planning and other areas where it is important to optimise goods transport processes. Effectively solving this problem allows for reducing costs, improving customer service and increasing the overall efficiency of business processes [8].

**Conclusion**. Economic and mathematical modelling remains a key tool for analysis and forecasting in the modern economy. Despite challenges such as the complexity of models and the need for high-quality data, technological and methodological developments help overcome these difficulties and open new prospects.

## References


1. Zhang, X., 2023. Analysis of practical applications using the linear programming model. Theoretical and Natural Science, 25, pp.239–247. – URL: https://doi.org/10.54254/2753-8818/25/20240979.
2. Dai, Y.-H., 2023. An overview of nonlinear optimization. Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2022. – URL: https://doi.org/10.4171/icm2022/72.
3. Avishan, F., Yanıkoğlu, İ., Soysal, M., 2025. Adaptive optimization approach for production and distribution planning of perishable food products under demand uncertainty. Annals of Operations Research. – URL: https://doi.org/10.1007/s10479-025-06552-5.
4. Mamedov, K.Sh., Niyazova, R.R., 2024. Innovative improved approximate solution method for the integer knapsack problem, error compression and computational experiments. Radio Electronics, Computer Science, Control, (4), pp.1–10. – URL: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-4-6.
5. Zheng, J., 2022. Diet problem and the method of linear programming. Highlights in Science, Engineering and Technology, 26, pp.124–129. – URL: https://doi.org/10.54097/hset.v26i.3697.
6. Silalahi, B.P., Hanum, F., Setyawan, F., Supriyo, P.T., 2021. One-dimensional cutting stock problem that minimizes the number of different patterns. Barekeng: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan, 16(3), pp.805–814. – URL: https://doi.org/10.30598/barekengvol16iss3pp805-814.
7. Munapo, E., 2020. Development of a dummy guided formulation and exact solution method for the traveling salesman problem. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(4(105)), pp.12–19. – URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203865.
8. Stetsyuk, P., Stovba, V., Khomiak, O., 2022. Two-stage transportation problem and its two modifications. Journal of Numerical and Applied Mathematics, 1(1), pp.92–107. – URL: https://doi.org/10.17721/2706-9699.2022.1.07.

# TIME-SERIES FORECASTING OF EXCHANGE-TRADED FUND LIQUIDITY

**Davydov A.[1], Revina T.[2]**
[1]Johannes Kepler Universität Linz (JKU), Linz, Austria
[2]V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

**Abstract.** This study investigates the short-horizon predictability of exchange-traded fund (ETF) liquidity using time-series methods. Liquidity is proxied by the Amihud illiquidity measure and transformed logarithmically to address skewness and extreme values. The forecasting task is formulated as a one-step-ahead prediction problem and evaluated in a walk-forward expanding-window framework. A naive persistence benchmark is compared with autoregressive models and nonlinear machine learning methods.

The results show that ETF liquidity exhibits strong persistence: autoregressive models with multiple lags reduce forecast error by approximately 25–30% relative to the naive benchmark. While lagged volatility is negatively related to future liquidity, its inclusion does not improve linear forecasting performance, indicating that most of its predictive content is already captured by liquidity dynamics. A gradient boosting model provides an additional improvement of about 4–5%, suggesting the presence of nonlinear effects, particularly during periods of elevated market stress.

Robustness analysis across macroeconomic regimes and across multiple ETFs (SPY, IWM, XLF) confirms that these findings are stable and not asset-specific. Overall, the results indicate that short-term ETF liquidity is predictable and largely driven by persistent dynamics, with limited but meaningful nonlinear contributions.

**Keywords**: ETF liquidity, Amihud illiquidity, time-series forecasting, autoregressive models, gradient boosting, financial markets.

**Introduction.** Market liquidity is a fundamental characteristic of financial assets, reflecting the ability to trade without causing significant price impact. In empirical research, liquidity is not directly observable and is typically approximated using proxies constructed from trading data. One of the most widely used measures is the Amihud illiquidity ratio (1), which relates absolute returns to trading volume [1]:

$$ILLIQ_t = \frac{|R_t|}{DollarVolume_t}. \quad (1)$$

This study focuses on exchange-traded funds (ETFs), which represent a large and diverse segment of equity markets. The central question is whether daily ETF liquidity is predictable at a one-day horizon and to what extent different modeling approaches can capture this predictability.

**The purpose of the work.** The purpose of this study is to evaluate the predictability of ETF liquidity at a short horizon using time-series forecasting methods and to compare the performance of autoregressive and nonlinear models. The analysis also examines whether additional factors, such as volatility, provide incremental predictive value and whether the results remain stable across different macroeconomic regimes and across assets. Understanding these properties is important for assessing the dynamics of market liquidity and its role in financial stability.

**Formulation of the problem.** The forecasting task is formulated as a supervised regression problem, where models learn a mapping from historically observed liquidity-related variables to the next-day value of log illiquidity [2, Chs. 3 and 14]. At each time step, the objective is to estimate the next-day value of log illiquidity using only information available up to the current period. Model performance is evaluated using a walkforward expanding-window framework, where the training sample increases over time and forecasts are generated sequentially. This design preserves the temporal ordering of financial data and is consistent with recent machine-learning forecasting studies emphasizing strict alignment between information availability, prediction generation, and realized outcomes [3]. Forecast accuracy is assessed using standard error metrics, including root mean squared error (RMSE) and mean absolute error (MAE).

**Solving the problem.** Liquidity is measured using the Amihud illiquidity ratio. Due to strong skewness and the presence of extreme values, the forecasting target is defined as the logarithm of illiquidity, which yields a more stable series suitable for regression-based models.

As a benchmark, a naive persistence forecast is used, where the next-day value is set equal to the current observation (2). This choice is motivated by the strong day-to-day persistence of liquidity, making the naive model a simple but competitive reference.

$$log(ILLIQ_{t+1)} = log(ILLIQ_t). \quad (2)$$

The primary linear specification is an autoregressive model, where current liquidity is explained by its own past values. Different lag lengths are evaluated, and the optimal configuration is found at approximately 20 lags. This specification captures multi-day persistence in liquidity and delivers a substantial improvement in forecasting accuracy relative to the naive benchmark, reducing RMSE by approximately 28% (RMSE = 1.1015) and MAE by a similar magnitude. This indicates that liquidity dynamics exhibit strong and predictable temporal structure.

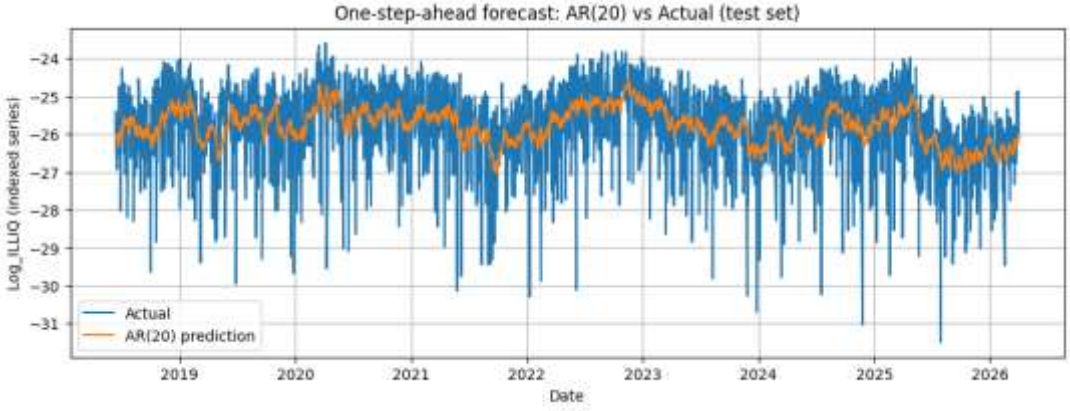



Fig. 1. AR(20) vs actual log (ILLIQ)

To assess whether additional information improves predictive performance, the model is augmented with lagged volatility measures. Although volatility exhibits a stable negative relationship with future liquidity, its inclusion does not improve forecasting accuracy and slightly worsens performance. This suggests that the linear component of volatility-related information is largely already embedded in past liquidity values.

To account for potential nonlinear effects, a gradient boosting regression model is implemented. Recent evidence on illiquidity forecasting suggests that machine-learning models can capture nonlinear relationships in liquidity-related time series, particularly when augmented with additional market or state variables [4]. In contrast to the linear specification, this model is trained on an extended feature set that includes lagged liquidity, rolling statistics of liquidity, volatility measures, and regime-related indicators. These features are designed to capture persistence, state dependence, and potential nonlinear responses under stressed market conditions.

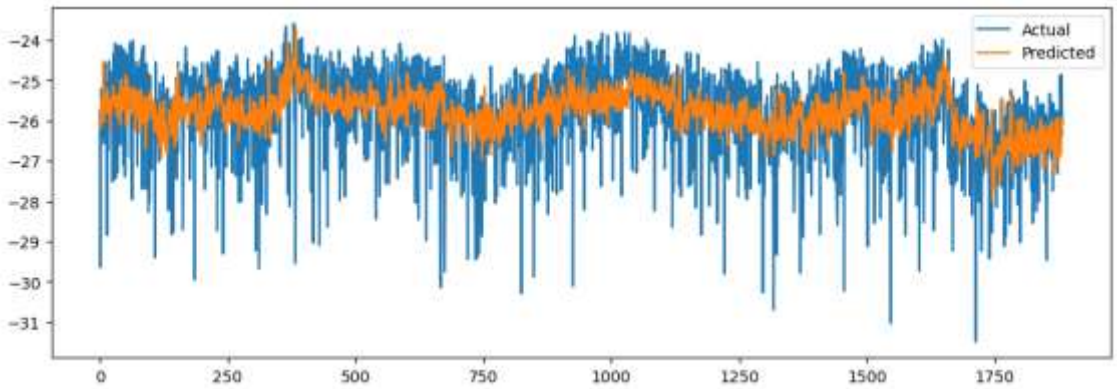



Fig. 2. Gradient Boosting predictions vs actual log(ILLIQ)

The results show that using only lagged liquidity does not outperform the autoregressive benchmark. However, the inclusion of volatility-related features leads to a substantial improvement in performance, reducing RMSE to approximately 1.0677. Additional features, such as regime indicators, provide only marginal gains, while calendar effects do not improve performance and slightly deteriorate it. The best-performing specification achieves an RMSE of approximately 1.066, corresponding to an improvement of about 4–5% relative to the AR(20) benchmark.

These findings suggest that the gains from nonlinear models are not driven by model flexibility alone, but by their ability to capture interactions involving volatility and market state that are not accessible to linear models.

To evaluate the stability of these results, the analysis is extended across different macroeconomic regimes and across multiple ETFs representing distinct market segments (SPY, IWM, XLF). The autoregressive specification consistently outperforms the naive benchmark in all regimes, with RMSE improvements remaining in a relatively narrow range. Similarly, the cross-asset analysis yields highly comparable results despite differences in underlying liquidity levels and market structure. This consistency indicates that short-horizon liquidity persistence is not asset-specific and remains stable across varying market conditions.

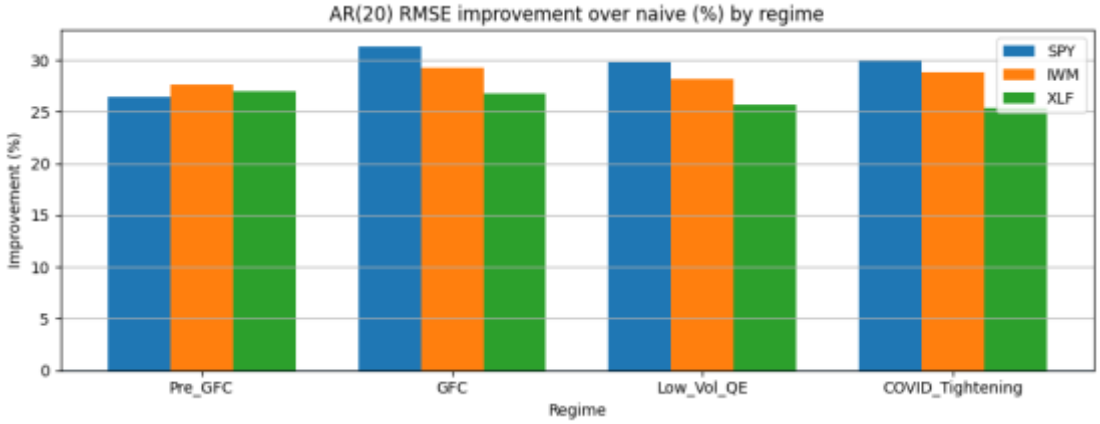



Fig. 3. AR(20) RMSE improvement over naive by regimes and assets

The stability of these results is further illustrated in Fig. 3, which reports RMSE improvements of the AR(20) model over the naive benchmark across regimes and assets. The magnitude of improvement remains consistently within a relatively narrow range (approximately 25–32%) for all ETFs and periods. This indicates that the predictive gains from autoregressive structure are not concentrated in specific market environments but persist across both high- and low-volatility regimes. The similarity of results across assets further supports the view that liquidity persistence represents a general feature of ETF markets rather than an asset-specific effect.

**Conclusion.** The results show that ETF liquidity exhibits strong short-horizon persistence, with autoregressive models reducing forecast error by approximately 25–30% relative to a naive benchmark. While volatility is negatively related to future liquidity, it does not provide additional predictive power in linear models, indicating that its linear component is largely captured by past liquidity values.

Nonlinear methods offer modest but consistent improvements, suggesting the presence of interaction effects, particularly under stressed market conditions. Importantly, these findings remain stable across different macroeconomic regimes and across multiple ETFs, indicating that liquidity persistence represents a structural feature of ETF market dynamics rather than an asset-specific or regime-dependent phenomenon. This interpretation is consistent with prior evidence on the gradual adjustment of market variables toward efficiency.

**References**


1. Amihud, Y.: Illiquidity and stock returns: cross-section and time-series effects. *Journal of Financial Markets*, 5(1), pp. 31–56 (2002). https://doi.org/10.1016/S1386-4181(01)00024-6
2. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. https://link.springer.com/book/9780387310732
3. Balcıoğlu Y. S., Merter A. K. A Machine Learning-Based Long-Short Decision Framework for Hourly EUR/USD Forecasting under Strict Temporal Alignment. *Journal of Expert Systems and Sustainable Development*, Vol. 2, Issue 1pp. 41–57, (2026). https://doi.org/10.65069/jessd21202610
4. Sasani F., Moghareh Dehkordi M., Ebrahimi Z., Dustmohammadloo H., Bouzari P., Ebrahimi P., Lencsés E., Fekete-Farkas M. Forecasting of Bitcoin Illiquidity Using High-Dimensional and Textual Features. *Computers*, 13(1), 20, (2024). https://www.mdpi.com/2073-431X/13/1/20

# ORCHESTRATING DIGITAL INNOVATION: MULTI-LEVEL PATHWAYS, MECHANISMS, AND CONSTRAINTS

**Denisova O.**
Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper develops a conceptual model of digital innovation orchestration in which digital innovation is treated not as a firm-internal, linear, or technology-centred process, but as the outcome of coordinating distributed actors, interdependent infrastructures, platform rules, interoperability regimes, and regulatory alignment. The purpose of the research is to systematise the conditions, mechanisms, pathways, and constraints that shape orchestration capacity in digital ecosystems. The study applies a conceptual synthesis of recent research on digital ecosystems, platform governance, data ecosystems, and official policy frameworks on interoperability, data regulation, digital markets, and AI governance. The proposed model reconceptualises macro, meso, and micro dimensions as orchestration conditions rather than merely analytical levels. It decomposes orchestration into coordination, generative, adaptive, and control-and-constraint mechanisms and identifies five archetypal orchestration pathways: centralised, distributed ecosystem, AI-mediated, regulation-constrained, and interoperability-driven. The paper argues that orchestration is the critical bridge between innovation generation and realised value because it governs scaling, adoption, monetisation, appropriation, and retention, while constraints reshape orchestration architectures and recursive system effects.

**Keywords:** digital innovation; orchestration; digital ecosystems; platform governance; interoperability; artificial intelligence; value realisation.

**Introduction.** Digital innovation is increasingly difficult to explain through the conventional image of a firm-internal innovation process moving from idea generation to development and commercialisation. In digital environments, innovation emerges through the interaction of platforms, complementors, data infrastructures, standards, APIs, regulatory requirements, and users whose roles are not fully controlled by a single firm. Digital ecosystems, therefore, alter the locus of innovation: value is not produced only by deploying a technology, but by aligning heterogeneous actors and resources around a viable configuration of coordination, access, control, and value appropriation [1; 2; 3]. This shift challenges three persistent assumptions in the literature: that innovation is primarily internal to the firm, that innovation follows a linear sequence, and that digital innovation can be explained mainly by technological affordances. Digital innovation can therefore be conceptualised as a problem of orchestration: how actors, infrastructures, rules, capabilities, and constraints are configured to enable innovation to be generated, scaled, adopted, monetised, and recursively transformed.

**The goal of the work** is to develop a conceptual explanation of digital innovation orchestration that links multi-level conditions, mechanisms, archetypal pathways, constraints, value realisation, and recursive system effects. The object of the research is digital innovation in platform-based and ecosystem-based environments, which are increasingly shaped by emerging digital technologies, including artificial intelligence, advanced data infrastructures, automation, and, prospectively, quantum computing. The subject is the orchestration capacity through which firms, platforms, public institutions, and ecosystem participants coordinate distributed innovation activity under conditions of technological interdependence, regulatory complexity, and data-driven transformation.

**Problem statement.** Although orchestration is widely used in research on platforms and ecosystems, the concept often remains metaphorical and insufficiently formalised. Platform owners, public coordinators, and networked ecosystems are said to "orchestrate" innovation, yet the specific mechanisms through which they coordinate actors, enable generativity, manage feedback, enforce constraints, and distribute value are rarely decomposed systematically. Recent studies show that platform coordination involves not only pricing or modular architecture, but also agency, misalignment, decision rights, governance structures, and the continuous management of interdependencies [2; 4]. At the same time, data ecosystems and European data spaces demonstrate that distributed innovation requires governance arrangements that balance decentralisation with operational centralisation, interoperability, trust, certification, and enforceable standards [5; 6]. The

problem is therefore not simply to describe levels of analysis, but to explain how these levels become conditions that enable or constrain orchestration.

**Contribution.** The model conceptualises macro, meso, and micro dimensions as orchestration conditions rather than as separate analytical levels. At the macro level, orchestration capacity depends on institutional coordination capacity, governance architectures, competition regimes, interoperability frameworks, data regulation, and the availability of digital and human resources. Official policy frameworks reinforce this interpretation by treating digital innovation as dependent on responsible technology diffusion, interoperability, data access, AI governance, and market contestability rather than on isolated technological deployment [8; 9; 10]. At the meso level, orchestration is shaped by ecosystem structure, platform governance, coordination asymmetries, process modularity, data-sharing intensity, and the density of inter-organisational connections. At the micro level, orchestration depends on digital maturity, integration capability, data and AI capability, knowledge recombination, access to data assets, and ecosystem positioning. These conditions do not determine innovation mechanically; rather, they configure the scope within which orchestration can occur.

The actor structure of digital innovation ecosystems has expanded substantially. This transformation increases ecosystem complexity and coordination intensity. Traditional actors, including firms, start-ups, universities, research organisations, investors, users, public authorities, and industry associations, remain important, but they now interact with technology-intensive participants such as hyperscale cloud providers, GPU/TPU infrastructure providers, foundation-model and LLM developers, data-space operators, AI auditors, cybersecurity providers, open-source communities, conformity-assessment organisations, and AI agents as delegated digital agency. This shift makes orchestration more distributed and infrastructure-dependent, since innovation increasingly relies not only on firms' internal capabilities, but also on computational infrastructure, data resources, platform interfaces, security mechanisms, certification procedures, and algorithmic coordination. As a result, orchestration must address not only collaboration among firms and institutions, but also the governance of data, models, interfaces, and automated decision processes.

First, the framework decomposes digital innovation orchestration into mechanisms. Coordination mechanisms include governance structures, standards, interoperability protocols, platform rules, role allocation, and decision-rights systems. They reduce uncertainty and make distributed action possible, but also redistribute control. Generative mechanisms include recombination, modularity, experimentation, scalability, and traceability; they explain how digital resources become sources of new products, services, processes, business models, and reusable modules. Adaptive mechanisms include AI-enabled adjustment, data-driven reconfiguration, feedback integration, and iterative experimentation; they allow orchestration architectures to respond to changing actor behaviour, market signals, and regulatory requirements. Control-and-constraint mechanisms include accountability, compliance, oversight, cybersecurity, procedural governance, and auditability; they limit arbitrary experimentation but make innovation legitimate and scalable in regulated settings [7; 10].

The second contribution is the identification of archetypal orchestration pathways. The centralised orchestration pathway is platform-led: a dominant coordinator defines interfaces, controls complementors, and organises value capture. It is efficient when coordination costs are high, but it may produce dependency and platform dominance. The distributed ecosystem pathway relies on network governance, shared ownership, negotiated standards, and collective rule-making; it is suitable for data spaces and industry-wide initiatives where legitimacy and trust are central. The AI-mediated pathway shifts part of coordination into algorithmic recommendation, automated decision support, adaptive execution, and intelligent service composition. The regulation-constrained pathway emerges in high-compliance environments where security, accountability, public infrastructure, and legal certainty dominate the design of orchestration. The interoperability-driven pathway relies on APIs, common standards, portability, data spaces, and technical compatibility as the main architecture of coordination. These pathways are not process sequences; they are governance and configuration archetypes that structure how innovation proceeds. In practice, these pathways may overlap, combine, or shift as ecosystems evolve.

Third, constraints and frictions are treated as constitutive elements of orchestration. Fragmentation, regulatory uncertainty, procedural complexity, dependency, power asymmetry, lock-in, interoperability limits, data-access restrictions, and platform dominance do not merely slow innovation. They actively reshape orchestration architectures by forcing actors to centralise control, standardise interfaces, introduce certification layers, restrict openness, or redesign value appropriation mechanisms. This is particularly visible in data ecosystems, where scaling creates a persistent tension between decentralised ideals and the need for operational coordination [6]. Constraints, therefore, act not only as barriers but also as design forces in ecosystem governance.

Finally, the model connects orchestration with value realisation. Digital innovation does not automatically generate economic or societal value. Between innovation outputs and realised outcomes lie commercialisation, adoption, diffusion, scaling, monetisation, data appropriation, platform ecosystem value capture, and retention mechanisms. Successful orchestration determines whether a digital product, service, workflow, data asset, or AI-enabled process remains a local experiment or becomes a scalable source of value. Recursive system effects then feed back into the conditions of subsequent innovation: network effects, spillovers, platform concentration, data concentration, market restructuring, and path dependence modify the very orchestration structures that enabled innovation in the first place [3; 7].

**Conclusion**. The paper conceptualises digital innovation as an orchestration problem rather than as a linear, firm-internal, or technology-centred process. Its contribution lies in three propositions and two extensions. First, macro, meso, and micro dimensions should be understood as conditions that enable or constrain orchestration capacity. Second, orchestration should be decomposed into coordination, generative, adaptive, and control-and-constraint mechanisms. Third, orchestration pathways should be treated as governance and configuration archetypes rather than as simple process sequences. The framework clarifies why innovation generation is insufficient without value realisation and why constraints are not external disturbances but forces that reshape orchestration architectures. For empirical research, the model can guide comparative studies of platform-led, network-driven, AI-mediated, regulation-constrained, and interoperability-driven ecosystems.

## References


1. Oberländer, A. M., Karnebogen, P., Rövekamp, P., Röglinger, M., & Leidner, D. E. (2025). Understanding the influence of digital ecosystems on digital transformation: The OCO theory. Information Systems Journal, 35(1), 368-413. https://doi.org/10.1111/isj.12539.
2. Leong, C., Lin, S., Tan, F., & Yu, J. (2024). Coordination in a digital platform organization. Information Systems Research, 35(1), 363-393. https://doi.org/10.1287/isre.2023.1226.
3. Jacobides, M. G., Cennamo, C., & Gawer, A. (2024). Externalities and complementarities in platforms and ecosystems: From structural solutions to endogenous failures. Research Policy, 53(1), 104906. https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104906.
4. Springer, V., Randhawa, K., Jovanovic, M., Ritala, P., & Piller, F. T. (2025). Platform design and governance in industrial markets: Charting the meta-organizational logic. Research Policy, 54(6), 105236. https://doi.org/10.1016/j.respol.2025.105236.
5. Kari, A., Bellin, P., Matzner, M., & Gersch, M. (2025). Governing the emergence of network-driven platform ecosystems. Electronic Markets, 35, 4. https://doi.org/10.1007/s12525-024-00745-9.
6. Kernstock, P., Harms, C., Hein, A., & Krcmar, H. (2025). Establishing and governing data ecosystems at the crossroads of centralization and decentralization. Electronic Markets, 35, 71. https://doi.org/10.1007/s12525-025-00810-x.
7. Ammann, J., & Hess, T. (2025). To sell, to donate, or to barter? Value creation and capture through business model types in decentralized data ecosystems. Electronic Markets, 35, 36. https://doi.org/10.1007/s12525-025-00775-x.
8. OECD. (2024). OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the Technology Frontier. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en.
9. European Commission. (2024). Interoperable Europe Act. Brussels: European Commission.
10. NIST. (2024). Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile. NIST AI 600-1. https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1.

# A SYSTEMS ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL DEPENDENCE AND TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY IN THE OIL AND GAS SECTOR

**Fataliyev T., Mehdiyev Sh.**
MSE Institute of Information Technologies, Baku, Azerbaijan

**Abstract**. In the context of global digital transformation and geoeconomic instability, technological dependence is increasingly strategic for high-tech and capital-intensive industries. The oil and gas sector, which supports states' energy security and macroeconomic stability, is characterized by a high degree of integration of cyber-physical systems, digital platforms, and specialized software, much of which is developed in foreign technological ecosystems. This increases the industry's structural vulnerability to external constraints and disruptions to global supply chains. This study aims to develop a methodological framework to ensure the technological sovereignty of the oil and gas sector through a systems analysis of its technological dependence. This paper examines the impact of dependence on foreign technologies in the areas of geological exploration, drilling, production automation, and digital management on the functional and institutional resilience of the sector. Technological sovereignty is understood as the industry's capacity to develop strategic technological solutions and to ensure sustainable development within the context of global interdependence. An integrated dependence assessment model is proposed that incorporates structural, digital, and institutional aspects. The results obtained can serve as a methodological basis for the formation of industrial and innovation policies aimed at increasing the technological sustainability of the oil and gas sector.

**Keywords**: Technological sovereignty, oil and gas sector, technological dependence, digital transformation, artificial intelligence, cyber-physical systems.

**Introduction.** The oil and gas sector (OGS), a main pillar of the national economy and energy security, relies heavily on complex, high-tech solutions, including geological exploration technologies, drilling and production equipment, automation systems, digital control platforms, and software [1].

Limited access to critical technologies, software updates, service support, and information can reduce production efficiency, increase operational risks, and limit long-term development opportunities for the industry. At the same time, technological sovereignty (TS) of the OGS is becoming increasingly important in the context of growing global geopolitical instability, the fragmentation of technological chains worldwide, and the rapid digitalization of the energy sector.

In these circumstances, ensuring TS is not viewed as isolated from global markets, but as the ability of the state and the industry to independently control, adapt, and develop critical technological solutions. This approach ensures the resilience of production processes, data security, and the continuity of process facility management. Developing national competencies, particularly in the areas of digital oil and gas technologies, cyber-physical systems, industrial software, and engineering services, is of particular importance.

Technological dependence (TD) in today's environment is not only material but also architectural. The digital transformation (DT) of the OGS is accompanied by the integration of cyber-physical systems, IoT devices, SCADA/DCS systems, distributed data processing platforms, cloud infrastructure, and intelligent control systems, radically altering the structure of technological interconnections within the industry [2,6]. In this context, dependence is formed not only through equipment imports but also through standards, data exchange protocols, software ecosystems, and licensed digital solutions.

Modern research shows that the expanding digitalization of energy systems increases the cyber-physical vulnerability of critical infrastructure [3]. Failures in software components, updates, remote access systems, or cloud services can be transmitted to the physical level of equipment operation, creating risks of production process shutdowns [2,4]. This is particularly evident in the automated production, intelligent drilling, and remote monitoring segments.

The high degree of network interconnectivity of digital energy systems amplifies the effect of cascading risks. As research into Smart Grid 2.0 and distributed energy network security demonstrates, a failure in a single node can trigger a chain reaction in related control subsystems [5]. Similar architectural interdependencies are characteristic of the OGS, where digital platforms integrate exploration, drilling, production, and logistics into a single information environment.

Despite a significant body of work devoted to the DT of energy and the cyberresilience of infrastructure [2–6], the scientific literature lacks a comprehensive methodological model for quantifying the TD of the OGS as a multilayered cyber-physical system. Existing studies primarily focus on either cybersecurity aspects or institutional mechanisms for regulating digital risks [7], without integrating structural, digital, and regulatory factors into a single analytical framework.

This necessitates the development of a systems approach that takes into account architectural dependencies, digital standards, and institutional constraints as part of a comprehensive assessment of the industry's technological vulnerability.

**The purpose of the work.** This study is devoted to the development of mechanisms for ensuring TS based on a systematic analysis of the TD of the OGS.

**Formulation of the problem**. In the context of DT, the OGS is becoming a complex cyber-physical system, in which TD is not fragmented but systemic and architectural. Vulnerabilities are concentrated in critical nodes of the digital infrastructure, including software ecosystems, data management platforms, and technological standards, which increases the industry's sensitivity to external constraints and supply chain disruptions. The problem is that the digital architecture of the OGS, which integrates hardware, software, platform services, and institutional mechanisms, creates systemic TD. Traditional import substitution measures fail to capture the complexity of digital connectivity and interdependencies, hindering the development of a TS strategy adequate to modern technological challenges.

Ensuring the OGS's technological security requires a holistic approach that considers hardware, software, algorithms, platform services, and socio-institutional aspects. Based on existing research and best practices, a multilevel model (Fig. 1) is proposed that integrates the key components of the TD and demonstrates their interrelations to form a sustainable and innovative ecosystem.

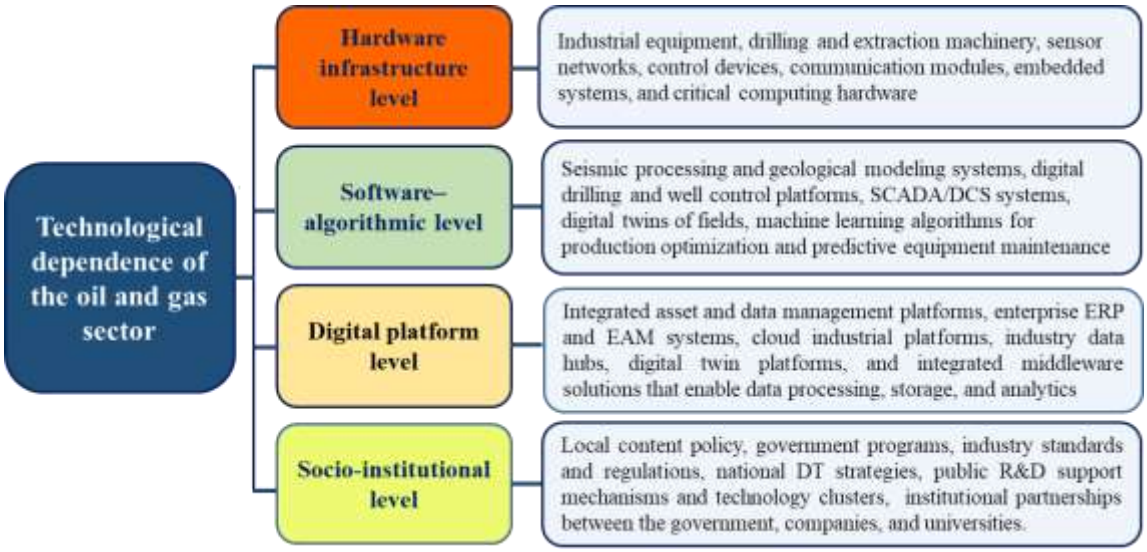



Fig. 1. Conceptual multilevel model of the OGS's TD.

The four-level conceptual model presented in Figure 1 demonstrates the interaction of TD elements, with each level playing a specific role in shaping the complex's unified ecosystem. Each level introduces its own specific dependencies, and the combination of these influences creates an integrated vulnerability.

An integral Technological Dependence Index (TDI) is proposed for assessment:

$$TDI = \sum_{i=1}^{4} \omega_i \cdot D_i, \quad \sum_{i=1}^{4} \omega_i = 1,$$

where $D_i$ denotes the normalized dependence indicator at level $i$, and $\omega_i$ represents the corresponding weight coefficient capturing the structural significance of the level within the overall system architecture. The normalization procedure is conducted within the interval [0,1], ensuring methodological consistency and cross-level comparability.

The index values are interpreted according to the following scale: values below 0.3 indicate a low level of TD; values in the range of 0.3–0.6 correspond to a moderate level; values exceeding 0.6 reflect a high level of systemic TD.

Based on the conducted systemic analysis, the following key mechanisms for ensuring TS in the OGS can be identified:

1. Diversification of suppliers of critical equipment and industrial software.
2. Development of domestic software–algorithmic solutions and digital platforms.
3. Localization of data processing, storage, and cybersecurity infrastructure.
4. Formation of resilient production and engineering value chains.
5. Implementation of local content policies and technological cooperation mechanisms.
6. State support for R&D and stimulation of indigenous technology development.
7. Development of highly qualified engineering and IT human capital for the OGS.

The methodology for determining the TDI is based on the decomposition of the OGS's TS or by key levels (hardware, software–algorithmic, digital platform, socio-institutional), the normalization of dependence indicators for each segment in the range [0,1] and the calculation of the integral index as a weighted sum of partial indicators, while the weighting coefficients are determined by expert methods (Delphi, AHP) and/or statistically - based on a quantitative analysis of the contribution of segments to the variation of production, financial and operational risks, which allows for their systemic criticality to be taken into account.

**Conclusion**. Research shows that the OGS's dependence on foreign technologies has a systemic impact on its functional and institutional resilience. This dependence increases the vulnerability of production and process chains, limits the autonomy of strategic management, and hinders the development of national engineering and digital ecosystems. The study develops a systemic model for ensuring TS in the OGS based on a multilevel decomposition of the technological architecture and proposes an integrated metric, the TDI, which allows for a quantitative assessment of the degree of TD using standardized metrics and expert-statistical weighting. It is shown that critical vulnerabilities are primarily concentrated at the software-algorithmic and platform levels, requiring a comprehensive strategy including the development of domestic industrial software, localization of digital infrastructure, supplier diversification, R&D support, and the development of sustainable institutional mechanisms for technological independence.

## References


1. Alguliyev, R., et al.: The industrial internet of things: the evolution of automation in the oil and gas complex. SOCAR Proceedings. 2, 066-071 (2019).
2. Saeed, S., et al.: Digital transformation in the energy sector: cybersecurity challenges and implications. Information. 15(12), 764 (2024).
3. Mehdiyev, S., Hashimov, M.: Analysis of Threats and Cybersecurity in the Oil and Gas Sector within the Context of Critical Infrastructure. International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS) 16(1), 43-53 (2024).
4. Ma, H., Lu, Y., Kou, Z., Xue, Z.: Cybersecurity and cyber-attacks in the growing natural gas and hydrogen industry: a systematic review of challenges and opportunities. Journal of Gas Science and Engineering. 143, 205744 (2025).
5. Nguyen, L. H., et al.: Towards secured Smart Grid 2.0: exploring security threats, protection models, and challenges. IEEE Access. 12, 115342–115360 (2024).
6. Nazari, Z., Musilek, P.: Impact of digital transformation on the energy sector: a review. Algorithms. 16(4), 211 (2023).
7. Lazari, A., et al.: Cyber resilience as a pillar of European energy security. CERRE Report. Brussels (2025).

# INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE OPERATIONS OF UKRAINIAN ENTERPRISES: CURRENT TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

**Kolisnichenko P.,[1] Kopytko M.,[2] Shevchenko N.[2]**
[1]WSHIU Academy of Applied Sciences, Poznan, Poland
[2]Lviv State University of Internal Affairs, Lviv, Ukraine

**Abstract.** This paper examines the role of information technologies in the operations of Ukrainian enterprises and substantiates their significance as a key factor in improving management efficiency and ensuring competitiveness in the context of the digital transformation of the economy. A comprehensive approach to the implementation of information technologies in enterprise business processes is proposed, which involves the integration of digital management tools, data analytics, cloud services, and automated decision-making systems. The main trends in the development of information technologies in enterprise operations are identified, including the digitalization of management processes, the development of platform-based solutions, and adaptation to an unstable external environment. The prospects for using information technologies to ensure the sustainable development of enterprises are substantiated.

**Keywords:** information technologies, enterprise, digitalization, management, competitiveness, development.

**Introduction.** In the current context of the digital transformation of the economy, information technology serves as a key driver of development for Ukrainian enterprises, shaping the direction of business process modernization and enhancing management efficiency. Business entities operate in an environment marked by high external turbulence, intensifying competition, and structural shifts caused by the state of war, which underscores the need for comprehensive digitalization of their operations. The set of factors influencing the effectiveness of information technology implementation includes the level of digital maturity of enterprises, the institutional environment, access to innovative resources, the quality of management decisions, and the integration of modern digital platforms.

**Objective of the Study.** To theoretically substantiate the role of information technologies in the activities of Ukrainian enterprises, identify current trends in their development, and determine promising areas of application in the context of the digitalization of the economy.

**Statement of the Problem.** Amid the transformation of the economic system and the growing impact of exogenous and endogenous challenges, Ukrainian enterprises face the need to ensure adaptability and operational resilience. Information technology is viewed as a key tool for improving management efficiency, optimizing operational activities, and building competitive advantages. At the same time, the implementation of digital solutions is often characterized by fragmentation, a lack of system integration, and insufficient alignment with the strategic development goals of enterprises, which limits their potential to ensure long-term economic growth [1–3].

**Main Body.** Under current conditions, Ukrainian enterprises operate under the influence of a range of destabilizing factors stemming from the state of war, which manifests itself in high security risks, systemic damage to infrastructure due to constant shelling, rising inflationary pressure, exchange rate volatility, disruptions to production and logistics chains, and a significant outflow of highly qualified personnel abroad. Such conditions objectively complicate the maintenance of business continuity, reduce investment attractiveness, and limit opportunities for strategic enterprise development. At the same time, despite these challenges, domestic businesses are demonstrating a high level of adaptability by accelerating digital transformation processes, which serves as one of the key tools for enhancing business efficiency and resilience. In particular, there is an intensive adoption of information technologies across all areas of business operations, including the automation of management and production processes, the use of cloud services, business analytics systems, and digital platforms, as well as the integration of artificial intelligence-based solutions to optimize management decision-making, demand forecasting, risk management, and personalization of customer interactions.

Thus, the combination of crisis factors and innovative opportunities is shaping a new paradigm for the development of Ukrainian enterprises, in which information technology serves not only as a tool for improving efficiency but also as a strategic foundation for ensuring their competitiveness and long-term sustainability.

The key technologies used by modern Ukrainian enterprises are presented in Table 1.

Table 1

**Characteristics of information technologies used by Ukrainian enterprises**

| **Information Technology** | **Description and Examples of Use** | **Significance for Enterprise Functioning** |
|---|---|---|
| ERP systems (Enterprise Resource Planning) | Integrated systems for managing enterprise resources (finance, production, inventory, procurement) | Ensure comprehensive integration of business processes and creation of a unified management information system |
| CRM systems (Customer Relationship Management) | Systems for managing customer relationships (sales, marketing, service) | Improve customer service quality, support sales growth, and enhance customer-oriented strategies |
| BI systems (Business Intelligence) | Tools for data analytics, reporting, and decision support | Enable in-depth analysis of enterprise performance and improve the quality of managerial decision-making |
| Cloud computing | Use of remote servers for data storage and processing (e.g., Microsoft Azure, Google Cloud) | Provide flexibility, scalability, mobility, and business continuity, especially under crisis conditions |
| Big Data and data analytics | Processing large datasets for forecasting and optimization | Increase forecasting accuracy, improve risk management, and optimize operational costs |
| Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning | Algorithms for automation, demand forecasting, chatbots, recommendation systems | Enhance decision-making efficiency, automate complex processes, and support innovation-driven development |
| RPA (Robotic Process Automation) | Automation of routine tasks (accounting, document processing, data entry) | Reduce labor costs, minimize human error, and increase productivity |
| Electronic document management systems | Digital systems for document creation, exchange, and storage | Improve speed, transparency, and control of management processes |
| SCM systems (Supply Chain Management) | Systems for managing logistics and supply chains | Optimize supply processes and improve coordination across the value chain |
| IoT (Internet of Things) | Use of sensors and connected devices for monitoring operations (production, logistics) | Enhance real-time control, operational efficiency, and resource utilization |

Ukraine has launched the Diia.City digital platform for state regulation [5], which should be viewed as a new institutional and digital environment for the development of information technologies, was created to stimulate innovation and enhance the competitiveness of the national economy. Its operation is based on a combination of favorable legal, tax, and organizational mechanisms that ensure effective conditions for conducting IT business, attracting investment, and

developing human capital. Under martial law, such a platform takes on particular significance as a tool for enhancing business resilience, ensuring the adaptability of business processes, supporting digitalization, and mitigating the impact of external destabilizing factors.

In the context of post-war development, this platform could evolve into a multifunctional digital environment that integrates various sectors of the economy and facilitates the creation of a unified innovation space. Its potential lies in strengthening the information and economic security of enterprises by increasing the transparency of operations, reducing regulatory risks, expanding opportunities for digital transformation, and creating the conditions for retaining and developing highly skilled human capital. Thus, institutional support for state-level digital platforms is a key factor in Ukraine's recovery and long-term economic growth.

**Conclusion.** The study found that information technology is a key factor in ensuring the efficiency, adaptability, and competitiveness of Ukrainian enterprises in an unstable external environment. It has been demonstrated that the digital transformation of business processes, particularly the implementation of analytical systems, cloud technologies, and artificial intelligence-based solutions, forms the foundation for the sustainable operation and development of enterprises. It has been substantiated that the further expansion of the institutional-digital environment will contribute to strengthening information and economic security and ensuring Ukraine's long-term economic growth.

## References


1. Parashchych, M. I., & Nozhak, L. S. Digitalization and Its Role in the Activities of Ukrainian Enterprises. Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Development Challenges. 2022. No. 2 (8). Pp. 192–200.
2. Shkurenko O., Chorna T. An innovative strategy for enterprise development in the context of adapting to modern challenges. Adaptive Management: Theory and Practice. Economics Series. 2023. No. 16 (32). DOI: https://doi.org/ 10.33296/2707-0654-16(32)-10
3. Smirnova T. Analysis of contemporary aspects of the digitalization of business communications of enterprises in Ukraine: directions and tools. Entrepreneurship and Innovation, 2024. No. 31, pp. 62–67. https://doi.org/10.32782/2415-3583/31.10
4. Maziy N. Digital Innovations as a Driver of Business Process Optimization. Modern Economics. 2025, No. 53, pp. 182–187. DOI: https://doi.org/10.31521/modecon.V53(2025)-25.
5. Official website of Diya.City. Digital platform. URL: https://city.diia.gov.ua/

# INFORMATION TECHNOLOGIES OF PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENT USING VOLATILITY AND TREND IN THE UPPER CONFIDENCE INTERVAL ALGORITHM

**Konrad Krol[1], Sevostianova A.[2], Yushchenko Y.[2], Marshak O.[3]**
[1]CFF GmbH & Co. KG, Ilmenau, Germany
[2]National Transport University, Kyiv, Ukraine,
[3]National Shipbuilding University named after Admiral Makarov, Mykolaiv

**Abstract.** Project portfolio management in non-stationary economic environments requires selection rules that respond not only to shifts in the empirical mean of project performance but also to changes in dispersion and short-term trend. Classical Upper Confidence Bound (UCB) algorithms and their discounted variants encode adaptation through a single mechanism — the weighted empirical mean — and therefore detect regime changes only after enough evidence has accumulated to overturn the leading alternative. We propose a regime-aware extension of the confidence-bound family that couples a recursive exponentially-weighted variance estimator and a dual-EWMA short-term trend estimator into the selection index of each portfolio alternative. The resulting algorithm preserves the constant-time-per-step computational profile of UCB and its logarithmic regret on stationary subintervals, while reducing detection latency on regime breaks by exploiting second-order and first-derivative information that is invisible to discount-only adaptation. The volatility and trend gains are interpreted as managerial sensitivity coefficients that can be calibrated against the planning horizon and the expected magnitude of regime shifts. Calibration heuristics linking the EWMA half-lives to the horizon are derived. The contribution is positioned within the broader transition of project portfolio management from average-based evaluation toward distribution-aware, regime-sensitive decision support.

**Keywords:** Project Portfolio Management, Upper Confidence Bound, Multi-Armed Bandit, Exponentially-Weighted Moving Average, Volatility, Non-Stationary Environment, Adaptive Decision-Making.

**Introduction.** Analysis of modern information technologies in the field of project portfolio management involves assessing their functionality, integration level, analytical capabilities, and adaptability to organizational needs. Such systems ensure centralized management of multiple projects, enabling efficient resource allocation, cost control, risk assessment, and strategic decision-making based on actual information. Among the most widely used solutions are Microsoft Projectand Oracle Primavera, which are designed for large corporate and infrastructure projects and provide advanced tools for planning, scheduling, scenario modeling, and performance monitoring. At the same time, more flexible platforms such as Jira, Asana, and Trello have gained widespread adoption due to their ease of use, rapid implementation, and support for agile methodologies. These systems enable workflow visualization through Kanban boards and Gantt charts, making them especially popular among IT teams and medium-sized enterprises. Despite their advantages, these IT solutions also have limitations. Additional challenges include dependence on data quality, as inaccurate information may lead to ineffective managerial decisions, as well as cybersecurity and confidential data protection in cloud environments. Furthermore, project effectiveness analysis is complicated by non-stationarity, manifested in abrupt performance changes and variance fluctuations, which reduces the accuracy of conventional assessment methods.

Project portfolio management (PPM) in volatile economic environments faces a recurring challenge: project performance series exhibit non-stationarity in the form of abrupt shocks, gradual drifts, and changes in the variance of returns that invalidate the stationarity assumption underpinning classical evaluation tools. Reinforcement-learning-based selection rules from the multi-armed bandit (MAB) family — particularly the Upper Confidence Bound (UCB) algorithm of Auer, Cesa-Bianchi and Fischer [1] and its discounted variant by Garivier and Moulines [2] — provide a principled exploration–exploitation trade-off. However, these algorithms encode adaptation through a single channel: the weighting of older observations within the empirical mean. The second moment of the reward sequence (its dispersion) and its first time-derivative (its local

slope) carry distinct information about regime stability, and yet they are not explicit decision variables in any of the canonical formulations [3, 5, 6]. As a consequence, even sophisticated discount-based bandits respond to regime shifts only after enough evidence has accumulated to overturn the discounted mean of the leading alternative — by which time substantial cumulative regret has already been incurred.

**The purpose of the work** is to derive a confidence-bound selection rule for project portfolios in which volatility and short-term trend appear as explicit, recursively-updated decision components, and to interpret their coefficients as managerial sensitivity gains controlling how aggressively the portfolio reacts to regime instability.

**Formulation of the problem.** Let a portfolio consist of $N$ candidate projects indexed $i = 1, \ldots, N$. At each iteration $t$ the manager allocates resources to one project and observes a reward $R_i(t)$ drawn from a non-stationary distribution $P_i(t)$. The cumulative regret is defined as

$$R_T = \sum_{t=1}^{T} \left( \mu^*(t) - \mu_{i_t}(t) \right), \tag{1}$$

where $\mu^*(t)$ is the optimal expected reward at time $t$ and $i_t$ is the project chosen at iteration $t$. The classical UCB1 index of Auer et al. [1] is

$$UCB_i(t) = \hat{\mu}_i(t) + \sqrt{\frac{2 \ln t}{n_i(t)}}, \tag{2}$$

where $\hat{\mu}_i(t)$ is the empirical mean of project $i$ and $n_i(t)$ is its selection count. Equation (2) treats all past observations equally and conveys no information about either the conditional dispersion or the local slope of the reward sequence. Hence, the algorithm responds to regime change only after the (possibly discounted) mean has shifted enough to overturn the leading project, which under realistic noise-to-signal ratios produces a detection lag proportional to the inverse of the post-shift signal magnitude.

**Solving the problem.** Two complementary signals are formalized as recursively-updated decision components. The first is an exponentially-weighted moving variance estimator, in the spirit of Roberts [11], adapted to bandit feedback:

$$\sigma_i^2(t) = \alpha \left( R_i(t) - \hat{\mu}_i(t-1) \right)^2 + (1 - \alpha)\, \sigma_i^2(t-1) \tag{3}$$

with smoothing constant $\alpha \in (0, 1]$. The recursion in (3) admits a constant-cost update – $O(1)$ memory and $O(1)$ compute per project per iteration – which is essential for portfolios containing dozens of alternatives. Crucially, $\sigma^2_i(t)$ tracks the conditional dispersion of the most recent observations and therefore reacts to a widening of the data-generating distribution itself, whereas a discounted mean reacts only to a translation of that distribution.

The second signal is a dual-EWMA short-term trend estimator that approximates the local slope of the conditional mean as the difference between a fast and a slow exponentially-weighted moving average:

$$\begin{aligned} m_i^F(t) &= \beta_F\, R_i(t) + (1 - \beta_F)\, m_i^F(t-1), \\ m_i^S(t) &= \beta_S\, R_i(t) + (1 - \beta_S)\, m_i^S(t-1), \\ \Delta_i(t) &= m_i^F(t) - m_i^S(t), \quad \beta_F > \beta_S. \end{aligned} \tag{4}$$

The signed quantity $\Delta_i(t)$ approximates the short-term derivative of the conditional expectation: positive values indicate an emerging upward regime, negative values an emerging decline. This construction is widely used in technical analysis under the moving-average convergence/divergence interpretation, and a related envelope construction is the foundation of Bollinger bands [12], which we exploit below.

These two signals enter the confidence-bound index as additive components, alongside a discounted exploration term $B_i(t)$:

$$\psi_i(t) = \hat{\mu}_i(t) + B_i(t) + k\, \sigma_i(t) + d\, \Delta_i(t), \tag{5}$$

where the discounted exploration term, generalising the construction of Garivier and Cappé [3] and Garivier and Moulines [2], is

$$B_i(t) \;=\; \sqrt{\frac{c_1 \ln t + c_2 \ln\ln \max(e,t)}{\max\left(1, \sum_{s \in T_i(t)} \lambda^{t-s}\right)}} \tag{6}$$

with discount factor $\lambda \in (0, 1]$ and constants $c_1, c_2 > 0$. The coefficients $k, d \geq 0$ in (5) act as regime-change sensitivity gains: $k$ inflates the index of an alternative whose conditional dispersion grows, encouraging re-exploration of a project whose distribution is becoming wider; $d$ biases the index along the local slope of the conditional mean, accelerating both promotion of newly-improving projects and demotion of newly-deteriorating ones.

A useful interpretation arises from comparing equation (5) to the upper Bollinger envelope $U_i(t) = \hat{\mu}_i(t) + k\,\sigma_i(t)$. Whenever $\sigma_i(t)$ increases, the upper envelope widens, and the term $k\,\sigma_i(t)$ in (5) imports this widening directly into the selection rule. An alternative that enters a high-volatility regime therefore receives an exploration bonus proportional to the *current* regime's spread, rather than to the average spread observed since the start of the experiment. This is a structural improvement over discount-only adaptation: a discount factor reduces the weight of old data within $\hat{\mu}$, but does not detect that the data-generating distribution itself has become more uncertain. The trend coupling has analogous justification: the index of an alternative whose performance is decaying loses points proportionally to $d\,|\Delta_i(t)|$, so the algorithm reacts to the slope of decline rather than waiting for accumulated mean evidence to overturn the discounted leader.

**Parameter calibration.** The proposed algorithm requires the calibration of $(\alpha, \beta_F, \beta_S, k, d, \lambda)$. Each EWMA smoothing constant $x$ admits a half-life $n_{1/2} = \ln 2 / |\ln(1 - x)|$. Choosing $\alpha$ such that $n_{1/2} \approx T / 10$, where $T$ is the planning horizon in iterations, yields a volatility estimator that adapts within roughly one tenth of the horizon — a useful default that balances responsiveness against estimation noise. The fast and slow trend constants are typically chosen at a 4 : 1 ratio of half-lives, which separates structural drift from short-term noise. The gains $k$ and $d$ should be set so that the typical magnitudes of $k\,\sigma_i$ and $d\,\Delta_i$ are comparable to, but not larger than, the typical magnitude of the discounted exploration term $B_i(t)$; this preserves the logarithmic exploration schedule of UCB on stationary subintervals while activating regime sensitivity precisely when $\sigma$ or $\Delta$ depart from their long-run values. A practical heuristic for standardised reward streams is $k \approx 1$ and $d \approx 0.5$–$1.0$, refined by cross-validation against historical project outcome data.

**Conclusion.** Adding explicit recursive estimators of variance and short-term trend to a discounted UCB index produces a selection rule that responds to two regime signals — change in dispersion and change in conditional-mean slope — that are invisible to discount-only adaptation. The resulting algorithm preserves the $O(1)$-per-step computational profile of classical UCB, retains its logarithmic regret guarantee on stationary subintervals where $\sigma$ and $\Delta$ are zero in expectation, and reduces detection latency on regime breaks by exploiting second-order and first-derivative information. The interpretation of the coefficients $k$ and $d$ as managerial sensitivity gains makes the rule directly tunable by portfolio governance bodies, and the half-life-to-horizon calibration heuristic translates these gains into operationally meaningful settings. The approach is consistent with the broader transition of project portfolio management from average-based evaluation [7, 8] toward distribution-aware, regime-sensitive decision support [10], and complements the resilience framework of Bushuyev et al. [9]. Future work will extend the formulation to portfolios with multi-project allocation under capacity constraints, to settings where reward observations are delayed or censored, and to a finite-time regret analysis quantifying the reduction in detection lag as a function of $k$, $d$ and the half-life ratios.

## References


1. Auer, P., Cesa-Bianchi, N., Fischer, P. (2002). Finite-time analysis of the multiarmed bandit problem. Machine Learning, 47(2–3), pp. 235–256. https://doi.org/10.1023/A:1013689704352
2. Garivier, A., Moulines, E. (2011). On Upper-Confidence Bound Policies for Switching Bandit Problems. In: Algorithmic Learning Theory (ALT 2011), Springer LNCS 6925, pp. 174–188. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24412-4_16
3. Garivier, A., Cappé, O. (2011). The KL-UCB Algorithm for Bounded Stochastic Bandits and Beyond. JMLR Workshop and Conference Proceedings, 19, pp. 359–376. https://proceedings.mlr.press/v19/garivier11a/garivier11a.pdf
4. Lai, T.L., Robbins, H. (1985). Asymptotically efficient adaptive allocation rules. Advances in Applied Mathematics, 6(1), pp. 4–22.
5. Lattimore, T., Szepesvári, C. (2020). Bandit Algorithms. Cambridge University Press, 537 p. https://doi.org/10.1017/9781108571401
6. Slivkins, A. (2019). Introduction to Multi-Armed Bandits. Foundations and Trends in Machine Learning, 12(1–2), pp. 1–286. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.07272
7. Cooper, R.G. (2022). The 5th Generation Stage-Gate Idea-to-Launch Process. Research-Technology Management, 65(2), pp. 25–35. https://doi.org/10.1109/EMR.2022.3222937
8. Teece, D.J. (2014). The Foundations of Enterprise Performance: Dynamic and Ordinary Capabilities in an Theory of Firms. Academy of Management Perspectives, 28(4), pp. 328–352.
9. Bushuyev, S., Bushuieva, V., Bushuyeva, N. (2022). Resilience Management of Projects in Turbulent Environment. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 4(22), pp. 5–12. https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.168
10. Bilonog, O., Yushchenko, Y. (2025). Adaptive Decision-Making Models for Project Portfolio Management. Management, Issue 2(42), pp. 29–48, https://doi.org/10.30857/2415-3206.2025.2.3
11. Roberts, S.W. (2000). Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages. Technometrics, 1(3), pp. 239–250.
12. Bollinger, J. (2002). Bollinger on Bollinger Bands. McGraw-Hill, New York, 227 p.

# INFORMATION TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTING DIFFERENT COMMUNICATION STRATEGIES IN REMOTE WORK ENVIRONMENTS

**Kulai D.**
State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The rapid development of digital technologies and the global shift toward remote work have significantly transformed communication processes within organizations. Modern companies increasingly rely on distributed teams whose effectiveness depends on the quality, speed, and adaptability of communication processes. This study examines the principal communication strategies used in remote work environments, analyzes the technological tools that support them, and identifies the key challenges organizations face in virtual collaboration. Particular attention is devoted to the role of digital platforms, asynchronous communication models, structured communication frameworks, and organizational culture in fostering effective interaction among geographically dispersed employees. The paper also highlights practical approaches that enable organizations to enhance collaboration, maintain employee engagement, and ensure sustainable performance in remote settings.

**Keywords:** remote work, communication strategies, digital collaboration, virtual teams, organizational communication, asynchronous communication, information technologies.

**Introduction.** The transition to remote work has become one of the most significant transformations in modern organizational practices. This shift has been driven by technological progress, globalization, and external factors such as pandemics and geopolitical instability. In such conditions, communication becomes a central element of organizational effectiveness.

Unlike traditional office environments, remote work relies primarily on digital communication channels, which fundamentally changes the nature of interaction between employees. The absence of physical presence complicates the exchange of information, reduces the impact of non-verbal cues, and increases the risk of misunderstandings.

**Purpose of the work.** The purpose of this study is to analyze contemporary communication strategies in remote work environments and evaluate the role of information technologies in supporting their implementation. Specifically, the research aims to identify the major communication challenges faced by distributed teams, examine the effectiveness of various digital collaboration tools, and determine best practices for optimizing communication processes in virtual organizations. In addition, the study seeks to explore how organizations can balance efficiency, flexibility, and employee well-being through the adoption of appropriate communication frameworks.

**Main part.** One of the most essential strategies for effective remote collaboration is the implementation of structured communication frameworks. In distributed work environments, communication cannot rely on spontaneity; instead, it must be intentional, predictable, and clearly organized. Organizations establish formal guidelines that define which communication channels should be used for specific purposes, expected response times, escalation procedures, and the appropriate formats for meetings and reporting. For instance, urgent issues may require instant messaging, while strategic discussions are better suited for video conferencing or documented written communication. Such frameworks reduce ambiguity, enhance transparency, and ensure consistency in information exchange across teams and departments [1].

Equally important is the adoption of advanced digital collaboration tools that enable seamless interaction regardless of geographical distance. Platforms such as Slack, Microsoft Teams, Zoom, Google Workspace, and Asana have become indispensable components of the modern digital workplace. These technologies support both synchronous and asynchronous communication, facilitate file sharing, streamline project coordination, and centralize organizational knowledge. By integrating communication, task management, and documentation functions into unified ecosystems, these tools improve operational efficiency and foster greater accountability. For example, project teams frequently combine messaging applications with workflow management

systems to monitor progress, assign responsibilities, and maintain visibility over project milestones [2].

A particularly significant trend in contemporary remote work is the growing reliance on asynchronous communication. Unlike synchronous communication, which requires participants to be available simultaneously, asynchronous communication allows individuals to contribute according to their own schedules. This model is especially valuable for multinational organizations whose employees operate across multiple time zones. Through tools such as email, collaborative documents, recorded video updates, and project management platforms, team members can exchange information without the constraints of real-time interaction. Asynchronous communication not only enhances flexibility but also promotes deeper concentration by minimizing interruptions and reducing the frequency of unnecessary meetings. Consequently, employees can allocate more time to analytical, creative, and high-value tasks [3].

At the same time, effective communication requires a high level of clarity and documentation [4]. Written communication becomes the primary source of information, which necessitates precise wording, detailed task descriptions, and systematic documentation of decisions.

Despite these advantages, remote communication is associated with several challenges. The lack of non-verbal cues complicates the interpretation of messages and may lead to conflicts. Communication overload caused by multiple digital tools reduces efficiency and increases stress levels. In addition, time zone differences slow down decision-making processes, while limited informal interaction weakens team cohesion [5]. Practical examples demonstrate the effectiveness of well-designed communication strategies. Many fully remote organizations have successfully implemented documentation-first cultures, asynchronous workflows, and transparent communication practices. Such approaches enable them to scale operations while maintaining productivity and alignment.

The Ukrainian business context provides particularly relevant examples of communication adaptation under conditions of uncertainty and crisis. Many companies have also adopted hybrid communication models that combine synchronous collaboration for urgent issues with asynchronous processes for routine tasks. These adaptive strategies have proven essential for maintaining business continuity, employee engagement, and organizational resilience in times of disruption [6].

**Conclusion.** Communication strategies in remote work environments play a critical role in ensuring organizational effectiveness. The combination of structured communication frameworks, digital tools, and a strong organizational culture allows companies to overcome the limitations of remote interaction.

At the same time, modern challenges such as communication overload, lack of non-verbal signals, and time zone differences require continuous adaptation of communication approaches. Future research should focus on the integration of artificial intelligence and automation tools to enhance communication processes in distributed teams.

## References


1. Microsoft: Work Trend Index Annual Report: The Future of Hybrid Work. Microsoft Research, Redmond (2024).
2. McKinsey & Company: The State of Organizations 2023: Ten Shifts Transforming Organizations. McKinsey Global Institute, New York (2023).
3. International Labour Organization: Working from Home: From Invisibility to Decent Work. ILO Publishing, Geneva (2023).
4. Newman, S., Thompson, R.: Digital communication clarity and documentation in virtual teams. Journal of Business Communication, 61(2), pp. 155–176 (2024).
5. Anderson, P., Brooks, L.: Communication overload and employee well-being in remote work environments. The International Journal of Human Resource Management, 35(4), pp. 520–541 (2024).
6. Deloitte: Global Human Capital Trends 2025: Navigating the Future of Work. Deloitte Insights, London (2025).

# INFORMATION TECHNOLOGY OF ADAPTIVE BUDGETING UNDER LIQUIDITY RISK

**Mandych O., Makohon V., Staverska T., Maliy O., Bershadska K.**
State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The paper proposes an information technology for adaptive budgeting of agricultural enterprises operating under seasonal and market uncertainty of cash flows. The study aims to develop a risk-oriented decision-support framework integrating scenario-based cash flow modeling, liquidity assessment, and ensemble Value-at-Risk (VaR) estimation to improve the accuracy and adaptability of budgeting in dynamic environments. The object of the research is the cash flow management system of agricultural enterprises, while the purpose is to design methodological and algorithmic tools for real-time adaptive budgeting under liquidity risk constraints. The proposed approach combines stochastic simulation of cash flows with liquidity gap analysis and net liquidity position evaluation. To account for uncertainty, scenario-based modeling is applied, generating a distribution of possible financial outcomes over the planning horizon. Liquidity risk is assessed using VaR estimated through an ensemble framework integrating historical simulation, GARCH volatility modeling, and machine learning techniques, particularly gradient boosting (XGBoost). This ensemble approach captures nonlinear dependencies, volatility clustering, and regime shifts in financial dynamics. A decision rule is formalized based on the comparison between forecasted liquidity deficit and ensemble VaR, enabling the identification of crisis and non-crisis states. A stochastic optimization formulation supports adaptive budget adjustment under risk constraints. The results show that the proposed system improves liquidity risk estimation accuracy, increases responsiveness of budgeting decisions, and reduces inertia of traditional financial planning. Backtesting of VaR confirms the robustness and adequacy of the ensemble model. Overall, the developed information technology transforms budgeting into an adaptive, risk-aware management system that strengthens the financial resilience of agricultural enterprises under uncertainty.

**Keywords:** agricultural enterprises, adaptive budgeting, liquidity, liquidity gap, Value-at-Risk, scenario modeling, machine learning, financial risk, decision support system.

**Introduction.** At present, increasing attention is paid to improving the efficiency of budgeting in agricultural enterprises under conditions of seasonal and market uncertainty of cash flows. Research efforts are focused on accurate estimation of financial dynamics and timely identification of cash gaps in near real time. A key feature is the high variability of liquidity, which determines the level of financial risk. In this context, accurate short-term forecasting of cash flow fluctuations becomes critical. This leads to the need for transitioning from deterministic budgeting approaches to adaptive models that incorporate stochastic behavior and risk-sensitive decision-making.

**Purpose of the Work.** The aim of the study is to develop criteria and embedded tools for implementing an adaptive budgeting algorithm for agricultural enterprises operating in real time, ensuring liquidity estimation and forecasting under uncertainty. Particular attention is given to a risk-oriented decision-making mechanism, where estimation error does not exceed a predefined threshold, achieved through the integration of scenario-based cash flow modeling and Value-at-Risk methodology enhanced by machine learning techniques.

**Problem Formulation.** Analysis of cash flow dynamics in agricultural enterprises reveals systematic liquidity gaps intensified by production seasonality and market volatility. This results in elevated liquidity risk and complicates budget planning. Traditional deterministic approaches fail to adequately capture the stochastic nature of financial flows and do not ensure timely identification of crisis states. The absence of an integrated framework for liquidity and risk assessment limits the ability to respond dynamically to changing financial conditions.

**Problem Solution.** Agricultural enterprises operate under highly uneven cash flow conditions, leading to systematic liquidity gaps and structural liquidity risk. Traditional budgeting approaches are insufficient as they do not account for stochastic and risk-dependent financial behavior.

An information technology of adaptive budgeting is proposed in the form of a decision support system integrating scenario-based cash flow modeling, liquidity assessment, risk analysis,

and decision generation. The system logic is based on the transformation pipeline: data → model → risk → decision (Fig. 1).

Scenario-based cash flow modeling is defined as:

$$F_t^S = simulate(CF_t, S), \quad (1)$$

where *S* is a set of macro-financial scenarios incorporating seasonality and lag effects. This enables the generation of a full distribution of possible financial outcomes.

Liquidity is evaluated using:

$$LiquidityGap_t = CF_t - (O_t + PR_t), \quad (2)$$

and net liquidity position:

$$L_t = A_t - L_t, \quad (3)$$

where $O_t$ denotes interest expenses, $PR_t$ debt repayments, $A_t$ liquid assets, and $L_t$ liabilities.

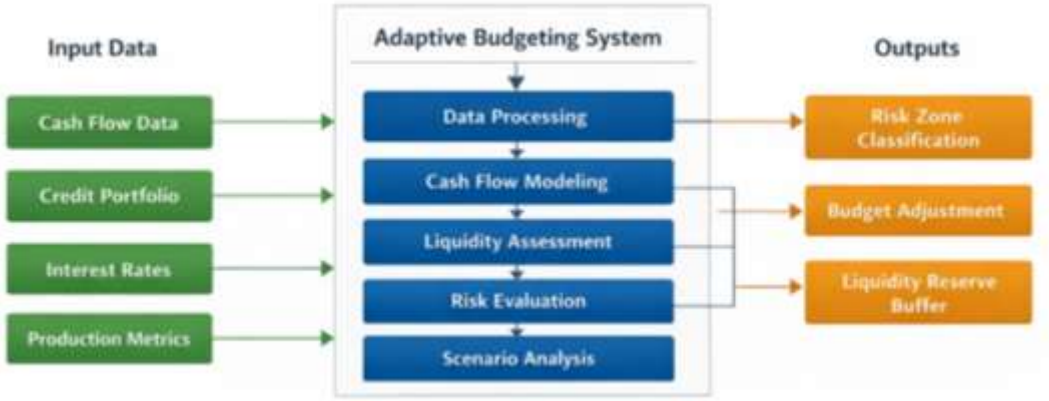



Fig. 1. Architecture of the Adaptive Budgeting System of an Agricultural Enterprise

Liquidity risk is estimated using Value-at-Risk:

$$VaR_{\{\alpha,t\}} = Quantile_{\{\alpha\}}(Loss_t^S), \quad (4)$$

where $Loss_t^S$ represents the distribution of potential liquidity losses derived from scenario simulation.

Unlike classical approaches, the study applies an ensemble-based risk estimation framework combining historical simulation, GARCH modeling, and machine learning techniques to improve the accuracy and robustness of liquidity risk assessment. Historical simulation preserves empirical loss distributions, while GARCH captures time-varying volatility and clustering effects. Machine learning methods are used to model nonlinear dependencies in financial data. In particular, an XGBoost model learns relationships between liquidity outcomes and explanatory variables, including lagged indicators and volatility features. This hybrid approach improves sensitivity to extreme events and enhances adaptability to changing financial regimes under uncertainty.

The ensemble integration is defined as:

$$VaR_{\{\alpha,t\}}^{\{ens\}} = w_1 VaR_t^{\{hist\}} + w_2 VaR_t^{\{garch\}} + w_3 VaR_t^{\{ml\}}, \quad (5)$$

where weights $w_i$ are optimized by minimizing a loss function focused on left-tail risk while applying regularization constraints.

This framework ensures explicit consideration of tail asymmetry, volatility clustering, and regime shifts in financial dynamics, improving the robustness of risk estimation under non-stationary conditions.

The resulting ensemble VaR serves as a threshold for decision-making:

$$D_t = \mathbb{I}\left(\widehat{L_t} > VaR_{\{\alpha,t\}}^{\{ens\}}\right), \quad (6)$$

where $\widehat{L_t}$ is the forecasted liquidity deficit.

Exceeding this threshold indicates a transition to a crisis regime requiring budget correction, cost optimization, and liquidity reserve formation.

The optimization problem is formulated as:

$$\min \mathbb{E}\,(Cost_t) + \lambda \cdot VaR_{\alpha,t}, \quad (7)$$

subject to:

$$CL_t \geq CL^{\{min\}}, CF_t - (O_t + PR_t) \geq 0, D_t \in \{0,1\}, \quad (8)$$

where $\lambda$ is the risk-aversion parameter.

Thus, the proposed framework integrates scenario-based modeling, stochastic volatility processes, and machine learning techniques into the budgeting system, facilitating a shift from deterministic procedures to adaptive financial flow management under liquidity risk conditions, thereby enhancing the financial resilience of agricultural enterprises in uncertain environments.

**Conclusions.** The proposed adaptive budgeting framework integrates scenario simulation, liquidity analysis, and ensemble Value-at-Risk, enabling a shift toward risk-oriented financial management. The combination of liquidity indicators and ensemble VaR allows capturing risk structure, including tail asymmetry and volatility dynamics, while the decision rule formalizes transitions between operational regimes. The use of machine learning methods improves risk estimation accuracy, which is confirmed by VaR backtesting results. Overall, the approach transforms budgeting into an adaptive system for managing the financial stability of agricultural enterprises under uncertainty.

## References


1. Allahverdiyev, E., Rao, X., & Trujillo-Barrera, A. (2025). Farm liquidity and business risk from the risk balancing perspective: Evidence from selected U.S. states. *Journal of Economics and Finance*. https://doi.org/10.1007/s12197-025-09722-0
2. Bao, W., Wang, Z., & Xu, J. (2021). Modeling volatility with asymmetric Student's t-distributions in agricultural finance. *Econometric Studies*, 8(2), 150–168.
3. Caldara, D., Gibson, J., & Wang, P. (2022). Ensemble modeling of liquidity stress: Combining Historical VaR, GARCH, and XGBoost. *Journal of Risk Analysis*, 17(1), 33-52.
4. Fink, G., Jack, K., & Masiye, F. (2020). Seasonal liquidity, rural labor markets, and agricultural production. *American Economic Review*, 110(11), 3351–3392. https://doi.org/10.1257/aer.20180607
5. Franke, J., & Härdle, W. (2024). A multi-level early-warning system for corporate finance using right-tail VaR. *Journal of Financial Econometrics*, 9(4), 240–262.
6. Gazali, M., Yadav, P., & Singh, R. (2021). Capital structure and liquidity management in agribusiness firms. *Journal of Corporate Finance in Agriculture*, 10(3), 45–60.
7. Kionka, J., Smith, L., & Wesson, G. (2020). Liquidity gap analysis and default risk in agricultural markets. *International Journal of Agricultural Finance*, 22(4), 211–230.
8. Molina, A., & Wilestari, B. (2023). Financial strategy formulation in agricultural enterprises: Balancing short-term liquidity and long-term investment. *Journal of Agricultural Finance*, 14(1), 75–98. https://doi.org/10.1080/1406099X.2023.1972587
9. State Statistics Service of Ukraine. (2024). *Statistical yearbook of Ukraine: Agriculture*. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
10. Ukrainian Agribusiness Club. (2025). *Annual report on agricultural financing and risk management in Ukraine*. Kyiv: Ukrainian Agribusiness Club.
11. Yen, T., Lee, S., & Peng, H. (2025). Historical VaR versus GARCH approaches in assessing liquidity risk in agribusiness. *Financial Risk Journal, 19*(2), 125–140.
12. Zhang, Y., & Liu, X. (2023). LSTM-based forecasting of right-tail Value-at-Risk in volatile financial markets. *Journal of Computational Finance, 11*(3), 87–104. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.01278
13. State Statistics Service of Ukraine. (2020). *Agriculture of Ukraine*. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
14. State Statistics Service of Ukraine. (2021). *Agriculture of Ukraine*. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
15. State Statistics Service of Ukraine. (2022). *Agriculture of Ukraine*. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
16. State Statistics Service of Ukraine. (2023). *Agriculture of Ukraine*. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.

# DIGITALIZATION OF INTERNAL AUDIT WITHIN THE ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEM

**Mazur I.[1], Alkema V.[2], Zybareva O.[3], Shepeliuk V.[4]**
[1]Technological University Dublin, Dublin, Ireland
[2]KROK University, Kyiv, Ukraine
[3]Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine
[4]Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

**Abstract.** The research focuses on the digitalization of internal audit in the enterprise management system. The object of the research is internal audit as a component of enterprise management, while the purpose is to substantiate an integrated model of internal audit digitalization and assess enterprise readiness for its implementation. The objectives of the study are to identify the key components of digital internal audit, determine criteria for assessing readiness, and formalize the assessment through an integral indicator. The study applies methods of analysis and synthesis, systematization, structural-logical modelling, comparative analysis, and generalization. The empirical basis includes a comparative dataset of five Ukrainian joint-stock companies assessed according to five criteria: formalized internal audit unit, accountability to the Supervisory Board or Audit Committee, integration with risk management and internal control, digitalization or IT development, and procedural maturity. The results show that all analyzed enterprises demonstrate a high level of institutional readiness for internal audit digitalization, although the disclosure of digital audit instruments remains uneven. The proposed model combines information, technological, analytical, control, and managerial components and enables a transition from descriptive audit practice assessment to structured evaluation of digital readiness, continuous monitoring, automated risk analysis, and support for managerial decision-making.

**Keywords:** Internal Audit, Digitalization, Enterprise Management, Internal Control, Risk Management, Data Analytics, Continuous Auditing, Digital Infrastructure, Audit Procedures, Readiness Indicator.

**Introduction.** Digital transformation significantly changes the role of internal audit in the enterprise management system, as international standards and recent studies emphasize the growing importance of internal audit in governance, risk management, control, and value creation [1; 2; 3]. Under conditions of increasing information flows, technological risks, regulatory requirements, and the need for timely managerial decisions, internal audit can no longer be limited to the retrospective verification of individual transactions [1; 4]. It increasingly becomes a function that combines control, analytics, risk assessment, monitoring, and support for corporate governance [3; 5; 6]. The relevance of the study is determined by the need to develop a systemic approach to the digitalization of internal audit, since many enterprises implement separate digital tools without creating an integrated model of their interaction with risk management, internal control, and managerial decision-making [2; 7; 8]. Therefore, the formalization of internal audit digitalization requires not only a conceptual model, but also a dataset and quantitative indicators that make it possible to compare enterprises according to their readiness for digital audit transformation [4; 6; 7].

**The purpose of the work is** to substantiate the theoretical provisions of internal audit digitalization in the enterprise management system, to develop an integrated model that combines information, technological, analytical, control, and managerial components, and to propose a formalized approach for assessing enterprise readiness for internal audit digitalization using a comparative dataset of Ukrainian joint-stock companies [1; 2; 4].

**Formulation of the problem.** In the context of enterprise digital transformation, internal audit is often reduced to the use of separate software tools, while its systemic role in management, risk control, and decision-making remains insufficiently formalized [2; 3; 8; 9]. Therefore, the problem of the study is to develop an integrated approach to internal audit digitalization and to define criteria for assessing enterprise readiness for its implementation [4; 6; 7].

**Solving the problem.** To solve the stated problem, a model of internal audit digitalization in the enterprise management system was proposed. The model includes five interconnected components: information, technological, analytical, control, and managerial. The information component covers data sources used in audit procedures, including accounting systems, ERP systems, CRM systems, document management systems, corporate reporting, and information on

business processes [1; 3; 5]. The technological component ensures data integration, processing, automation, and structuring [6; 7; 9]. The analytical component provides risk assessment, identification of deviations, anomaly detection, and analysis of weaknesses in business processes [4; 5; 7]. The control component includes audit procedures, monitoring, testing, and documentation of audit evidence [1; 6]. The managerial component transforms audit results into recommendations, corrective actions, and management decisions [1; 3; 10].

The empirical verification of the proposed approach was carried out using a comparative dataset of five Ukrainian joint-stock companies: JSC CB PrivatBank, JSC Ukrposhta, PJSC MetLife, PJSC IC Arsenal, and JSC Clearing House [11; 12; 13; 14; 15]. The companies were assessed according to five criteria: internal audit unit, accountability to the Supervisory Board or Audit Committee, integration with risk management and internal control, digitalization or IT development, and procedural maturity of internal audit [11; 12; 13; 14; 15]. The scoring scale was as follows: 0 means that the criterion is absent or not disclosed, 1 means partial presence or indirect confirmation, and 2 means clearly disclosed presence in public corporate reporting.

Table 1

**Comparative assessment of internal audit digitalization readiness in selected Ukrainian joint-stock companies**

| Company | Internal audit unit | Supervisory Board / Audit Committee | Integration with risk management and internal control | Digitalization / IT development | Procedural maturity | $DIRA_i$ | $K_{DIRA}$ | Readiness level |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| JSC CB PrivatBank | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 9 | 0.90 | High |
| JSC Ukrposhta | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | 1.00 | High |
| PJSC MetLife | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 9 | 0.90 | High |
| PJSC IC Arsenal | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 9 | 0.90 | High |
| JSC Clearing House | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | 1.00 | High |

**Note.** A value of "0" indicates that the feature is absent or not disclosed, "1" indicates partial presence, and "2" shows clearly disclosed presence in open corporate sources. The coefficient K_DIRA is calculated as the ratio of the actual score to the maximum possible value, DIRA_max = 10.

The dataset shows that all analyzed enterprises have a high level of readiness for internal audit digitalization, as their normalized readiness coefficients exceed 0.67 [11; 12; 13; 14; 15]. JSC Ukrposhta and JSC Clearing House obtained the maximum value of $K_i = 1.00$, which indicates the full disclosure of all five assessment criteria [12; 15]. JSC CB PrivatBank, PJSC MetLife, and PJSC IC Arsenal obtained $K_i = 0.90$, which also corresponds to a high level of readiness [11; 13; 14]. However, the difference between companies is related to the uneven disclosure of procedural maturity and digitalization or IT development. This confirms that the digitalization of internal audit depends not only on the existence of an internal audit unit, but also on the maturity of procedures, the level of integration with risk management, and the development of digital infrastructure [2; 4; 7; 8].

The average readiness coefficient for the analyzed sample can be calculated as follows:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i}{n},$$

where $\bar{K}$ is the average readiness coefficient and $n$ is the number of analyzed enterprises.

For the selected dataset:

$$\bar{K} = \frac{0.90 + 1.00 + 0.90 + 0.90 + 1.00}{5} = 0.94.$$

This result confirms that the analyzed group of enterprises has a generally high level of institutional readiness for internal audit digitalization [11; 12; 13; 14; 15].

**Conclusion.** The study confirmed that internal audit digitalization should be considered not as the implementation of isolated technological tools, but as a systemic transformation of audit

procedures, information flows, analytical capabilities, control mechanisms, and managerial decision support [2; 4; 6; 8]. The proposed model makes it possible to explain the relationship between digital infrastructure, internal audit, risk management, internal control, and enterprise management [1; 3; 10]. The use of formulas for calculating the integral readiness indicator and the normalized readiness coefficient provides a more objective basis for comparing enterprises and identifying their strengths and weaknesses in the transition to digital internal audit [4; 7].

The comparative dataset of Ukrainian joint-stock companies showed that all analyzed enterprises demonstrate a high level of readiness for internal audit digitalization [11; 12; 13; 14; 15]. At the same time, the results also revealed unevenness in the disclosure of digital audit instruments and procedural maturity. Therefore, further development of internal audit digitalization should focus on the integration of audit procedures with corporate information systems, automation of control processes, use of data analytics, artificial intelligence, process mining, predictive analytics, and continuous monitoring [5; 6; 7; 8; 9]. The proposed methodological approach may be used by enterprises to assess their current level of readiness for digital audit transformation and to determine priority directions for improving internal control and managerial decision-making [1; 4; 10].

## References


1. The Institute of Internal Auditors: Global Internal Audit Standards. The IIA, Lake Mary (2024). https://www.theiia.org/en/standards/2024-standards/global-internal-audit-standards/. Accessed 17 Mar 2026.
2. Pizzi, S., Venturelli, A., Variale, M., Macario, G.P.: Assessing the impacts of digital transformation on internal auditing: A bibliometric analysis. Technol. Soc. 67, 101738 (2021). https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101738. Accessed 17 Mar 2026.
3. Betti, N., Sarens, G.: Understanding the internal audit function in a digitalised business environment. J. Account. Organ. Change 17(2), 197-216 (2020). https://doi.org/10.1108/JAOC-11-2019-0114. Accessed 17 Mar 2026.
4. Betti, N., Sarens, G., Poncin, I.: Effects of digitalisation of organisations on internal audit activities and practices. Manag. Audit. J. 36(6), 872-888 (2021). https://doi.org/10.1108/MAJ-08-2020-2792. Accessed 17 Mar 2026.
5. Vasarhelyi, M.A., Alles, M., Kuenkaikaew, S., Littley, J.: The acceptance and adoption of continuous auditing by internal auditors: A micro analysis. Int. J. Account. Inf. Syst. 13(3), 267-281 (2012). https://doi.org/10.1016/j.accinf.2012.06.011. Accessed 17 Mar 2026.
6. Barros, C., Marques, R.P.: Continuous assurance for the digital transformation of internal auditing. J. Inf. Syst. Eng. Manag. 7(1), 11681 (2022). https://doi.org/10.55267/iadt.07.11681. Accessed 17 Mar 2026
7. Eulerich, M., Masli, A., Pickerd, J., Wood, D.A.: The impact of audit technology on audit task outcomes: Evidence for technology-based audit techniques. Contemp. Account. Res. 40(2), 981-1012 (2023). https://doi.org/10.1111/1911-3846.12847. Accessed 17 Mar 2026.
8. Bertacchini, F., Gabrielli, G., Lugli, E., Marchini, P.L.: The digital (r)evolution in internal audits: Are we there yet? Some insights from Italy. Manag. Audit. J. 40(2), 129-152 (2024). https://doi.org/10.1108/MAJ-06-2023-3952. Accessed 17 Mar 2026.
9. Vitali, S., Giuliani, M.: Emerging digital technologies and auditing firms: Opportunities and challenges. Int. J. Account. Inf. Syst. 53, 100676 (2024). https://doi.org/10.1016/j.accinf.2024.100676. Accessed 17 Mar 2026.
10. Manita, R., Elommal, N., Baudier, P., Hikkerova, L.: The digital transformation of external audit and its impact on corporate governance. Technol. Forecast. Soc. Change 150, 119751 (2020). https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119751. Accessed 17 Mar 2026.
11. JSC CB PrivatBank: Integrated annual report 2024. PrivatBank, Kyiv (2025). https://static.privatbank.ua/files/2024-integrated-annual-report.pdf. Accessed 17 Mar 2026.
12. JSC Ukrposhta: Management report for 2024. Ukrposhta, Kyiv (2025). https://www.ukrposhta.ua/doc/issuer-reporting/managment_report_for_2024.pdf. Accessed 17 Mar 2026.
13. PJSC MetLife: Financial statements and management report for 2024. MetLife, Kyiv (2025). https://www.metlife.ua/content/dam/metlifecom/ua/PDFs/Issuernews/2025/2025_04/Metlife_24fsu_with_Deloitte_signature.pdf. Accessed 17 Mar 2026.
14. PJSC IC Arsenal: Management report for 2024. Arsenal Insurance, Odesa (2025). https://www.icarsenal.od.ua/zvitupr2024.pdf. Accessed 17 Mar 2026.
15. JSC Clearing House: Financial statements, management report and audit report for 2021. Clearing House Bank, Kyiv (2022). https://clhs.com.ua/storage/app/media/docs/about/finansovi_pokaznyky/richni_zvity/2021_financial_statements_ENG_Management_report_Audit_Report.pdf. Accessed 17 Mar 2026.

# MACHINE LEARNING ANALYSIS OF TIKTOK SOCIAL MEDIA MARKETING STRATEGIES: UKRAINIAN ELECTRONICS RETAILERS

**Ponomarenko I.[1], Hulak D.[2], Yakushev O.[3], Pavlenko V.[4], Ponomarenko D.[5]**
[1]State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine
[2]Brunel University of London, London, UK
[3]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[4]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[5]International University of Business and Law, Mykolaiv, Ukraine

**Abstract**. The authors' analysis of the metadata of TikTok account publications of 14 leading Ukrainian electronics retailers for 2019–2026, based on machine learning algorithms, allowed the authors to obtain, for the first time in domestic research, a comparative empirical model for predicting the virality of brand-oriented video content. The presented model reliably describes the probabilistic nature of attracting the target audience in the conditions of algorithmic content distribution used by the TikTok recommendation system. It was identified that the quality of classification of viral video content publications depends on the ratio of behavioral interaction metrics, paid promotion status, and accumulated brand reputation capital. Thanks to machine learning algorithms, it is possible to ensure active interaction of the target audience with the video content of electronics retailers on TikTok.

**Keywords**: Machine Learning, Social Media Marketing, TikTok, Engagement Strategies, Content, Electronics Retailers.

**Introduction**. In the era of digitalization, social media has become an important communication channel for companies to establish effective, long-term communication with their target audience. The most active users who consume a significant number of goods and services include generations Z and Alpha [1]. These groups of consumers actively use TikTok to familiarize themselves with relevant video content. For companies, social media is an important tool for communicating with the target audience; accordingly, there is a need to identify optimal marketing strategies based on video content. The specifics of interaction between brands and users on TikTok involve receiving reactions in the form of likes, reposts, comments, etc. [2]. This information is publicly available, which allows for competitive analysis based on data from competitors' accounts on TikTok. The use of machine learning algorithms to process heterogeneous information allows brands to identify hidden relationships and patterns in the behavior of the target audience, as well as to form effective management solutions to optimize the marketing strategies of companies. The high level of popularity among modern users of various gadgets has encouraged electronics retailers to use TikTok to form a loyal target audience. Given the lack of systematic research on the effectiveness of marketing strategies on this platform in Ukraine, machine learning algorithms were used to process video content metadata on the example of 14 domestic electronics retailers.

**The purpose of the work** is to identify key features of marketing content strategies implementation of Ukrainian electronics retailers on TikTok through the use of modern machine learning algorithms.

**Formulation of the problem**. Analysis of diverse information from TikTok accounts of leading Ukrainian electronics retailers based on machine learning algorithms allows authors to identify patterns of audience engagement and form effective approaches to content marketing in conditions of high competition for the attention of social media users.

**Solving the problem**. For a comprehensive analysis, data for 2019-2026 were collected from TikTok public accounts of 14 leading electronics retailers in Ukraine [3]. The dataset contains 11,263 publications, and metrics include: number of views, likes, comments, shares, downloads, saves, and engagement level. In order to improve the effectiveness of machine learning algorithms, derived indicators were calculated: likerate, commentrate, sharerate, saverate, as well as time features (day of the week, time of publication).

Based on the available data, a classification of viral videos (top 25% by views within the brand) was carried out, and three machine learning models were pre-tested. The highest

classification accuracy was demonstrated by XGBoost: AUC = 0.902, F1-score for the "viral" class = 0.67, overall accuracy 85.3%. Figure 1 presents ROC curves [4], the analysis of which confirms the superiority of the gradient boosting method over alternative classification algorithms.

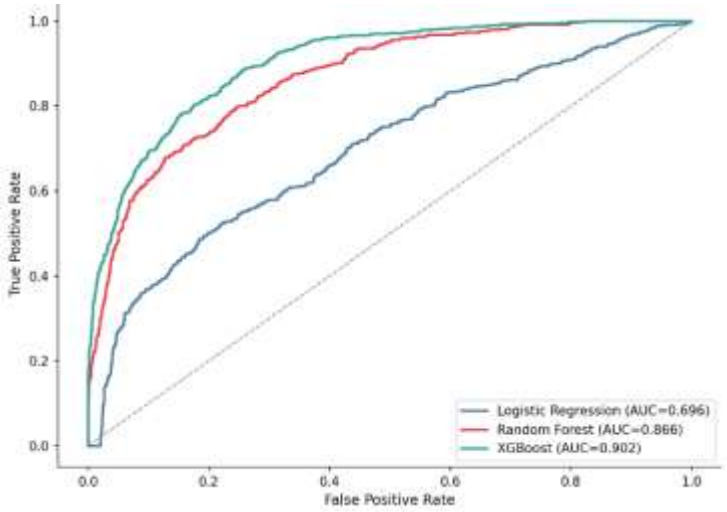



Fig. 1. ROC curves of the virality prediction model

Figure 2 presents a comparative analysis of the importance of the features available in the data set according to the Random Forest and XGBoost models [5, 6], which allows authors to draw reliable conclusions about the virality of content on TikTok among the leaders in the electronics market. The two ensemble models used determined the influence of the following metrics: CommentRate, ShareRate, and SaveRate. It should be noted that the identified predictors play a significant role in determining virality according to the logic of the TikTok recommendation system, which is focused on audience engagement. The predominance of interaction indicators between brands and the target audience over time metrics in TikTok encourages posting thematic content on an ongoing basis, which is focused on ensuring an economically feasible conversion rate.

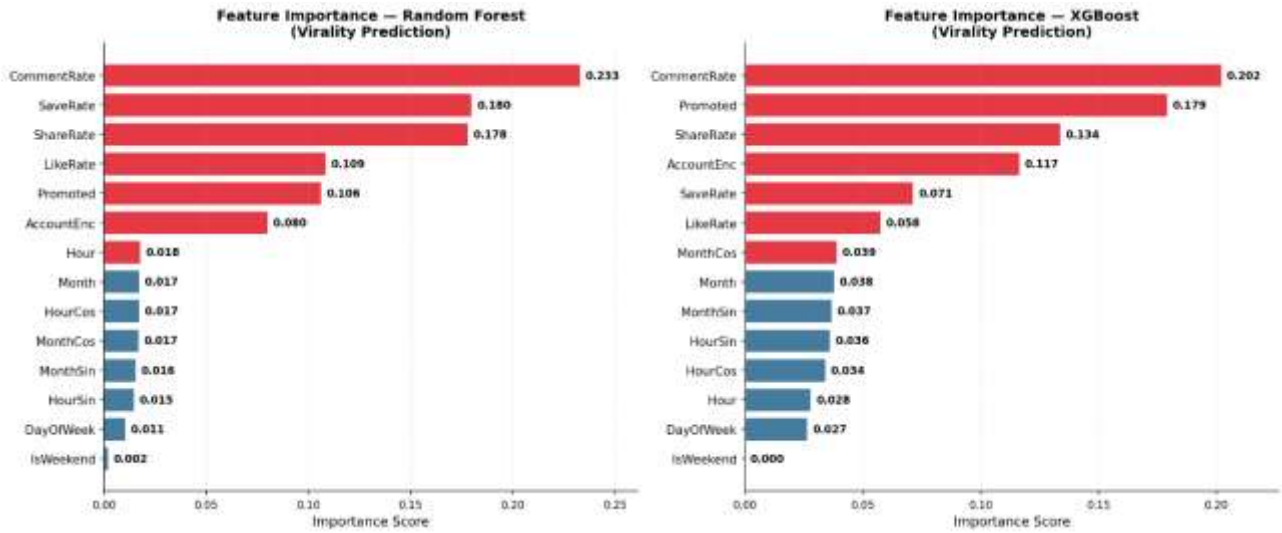



Fig. 2. Feature importance scores for Random Forest and XGBoost classifiers

In the XGBoost model, the Promoted indicator ranks second in importance, which characterizes the structural impact of paid promotion on TikTok on the reach of content within the studied sample. For this algorithm, the fourth most important indicator is AccountEnc, which is a brand identifier and allows brands to assess the virality patterns characteristic of certain companies. According to the available data, brands such as Allo, Rozetka, and Yabko demonstrate a higher

level of probability of creating viral publications regardless of the characteristics of individual videos. The detected effect is explained by the active work of brands in the digital environment with the target audience and ensuring a high level of loyalty with modern users on an ongoing basis. Support for identified partners is explained by the consistent quality of the content of the specified electronics retailers and their established positioning in the TikTok recommendation system [7, 8].

**Conclusion**. The results obtained proved the effectiveness of using machine learning algorithms in studying heterogeneous data from TikTok as an important social media for establishing effective communications by Ukrainian electronics retailers. It was found that the primary priority in implementing a content strategy is to use active video content formats to build communications with users and stimulate their interest. Metrics that allow companies to assess the quality of interest of the target audience are comments, sharing, and retention [9]. Along with this, views serve as a passive indicator, since a significant number of TikTok users can quickly scroll through a video content feed without transforming into leads. Secondly, the high level of significance of the identifier of the domestic electronics retailer (AccountEnc) indicates the accumulation effect of investments in a long-term marketing strategy in TikTok. Long-term interaction with the target audience in the studied social media provides structural advantages in the distribution of viral publications. It is impossible to increase the effectiveness of a company's marketing strategy on TikTok by optimizing individual posts alone. Thirdly, the insufficient level of predictive value of time features indicates the expediency of prioritizing the use of available resources to improve the quality of video content. To optimize marketing communications of domestic electronics retailers on social media, the content plan plays a less important role. Therefore, the use of machine learning algorithms to study the marketing strategies of domestic electronics retailers on TikTok is an effective approach. Based on the collected data set, the use of gradient boosting for predicting virality modeling in the context of brand-oriented marketing turned out to be optimal. The formation of effective content strategies on TikTok involves the accumulation of relevant information on a permanent basis, on the basis of which various machine learning algorithms are tested, and the optimal ones are selected [10].

## References


1. Blackford, Collin and Hamilton, Mitchell, "No Turning Back? Examining the Rise of Short-Form Content in Post-COVID Marketing for Gen-Z and Gen Alpha" (2025). Honors Thesis. 590. https://digitalcommons.lmu.edu/honors-thesis/590.
2. Jiang, H., Cai, J., Lin, Y., & Wang, Q. (2024). Understanding the effect of TikTok marketing on user purchase behavior: a mixed-methods approach. Electronic Commerce Research, 1-36.
3. TikTok. (2026). TikTok. https://www.tiktok.com/
4. Maureen, A., Henry, E. K., & Asuai, C. (2024). Application of RFM model on customer segmentation in digital marketing. Nigerian Journal of Science and Environment, 22(1), 57-67.
5. Yuan, X., Liu, S., Feng, W., & Dauphin, G. (2023). Feature importance ranking of random forest-based end-to-end learning algorithm. Remote Sensing, 15(21), 5203.
6. Ben Jabeur, S., Stef, N., & Carmona, P. (2023). Bankruptcy prediction using the XGBoost algorithm and variable importance feature engineering. Computational Economics, 61(2), 715-741.
7. Lu, Z. (2024). Personalized marketing and recommendation systems on TikTok. Advances in Economics, Management and Political Sciences, 88, 46-50.
8. Tan, Y., & Yoon, S. (2025). Testing the effects of personalized recommendation service, filter bubble and big data attitude on continued use of TikTok. Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, 37(5), 1280-1301.
9. Suhardi, S., Ichsan, N., Priyandaru, H., & Ihsan, F. I. (2024). Comprehensive analysis of ethical marketing strategies and customer engagement in TikTok business. Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA), 3(3), 760-765.
10. Melgarejo-Espinoza, R., Gonzales-Cruz, M., Chavez-Perez, J., & Iparraguirre-Villanueva, O. (2025). Impact of the TikTok algorithm on the effectiveness of marketing strategies: A study of consumer behavior and content preferences. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 16(2), 147-156.

# A FRAMEWORK FOR MAXIMIZING EXPECTED PERFORMANCE OF CARRIERS BY ENDOGENOUS SMART-CONTRACT-BASED CONSTRUCTION OF THE COALITION CHARACTERISTIC FUNCTION AND THE META-COALITIONAL STABILITY

**Romanuke V.V.**
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Ukraine

**Abstract.** A framework for maximizing the expected performance of the carriers is presented, where the coalitional characteristic function is endogenously constructed, and the optimal coalition of the carriers is formed. The characteristic function is based on the aggregation and simulation of smart-contract-defined interactions and is a derived functional of the blockchain state. The optimal coalition is based on the preferable stable coalitions and meta-coalitional stability reached at the expected performance maximum.
**Keywords:** transportation market, carriers, smart contracts, coalition, coalitional stability.

**Introduction.** In modern logistics systems, the increasing fragmentation of transportation markets and the growing reliance on digital infrastructures have significantly transformed the way carriers (transporters or transportation firms, enterprises, etc.) interact and coordinate. The emergence of distributed ledger technologies and smart contracts enables transportation firms to formalize operational agreements in a transparent, verifiable, and machine-readable form [1, 2]. This creates new opportunities for data-driven coalition formation, where cooperative structures among carriers can be systematically evaluated and optimized. A central challenge in this context lies in constructing the characteristic function $v(C)$, which assigns a quantitative value to every feasible coalition (or subcoalition) $C$ of carriers. Traditionally, such functions have been either assumed exogenously or estimated through simplified analytical models [3]. This, nevertheless, has been limiting the applicability of such characteristic functions in real-world environments, which are characterized by complex contractual dependencies, heterogeneous capabilities, and dynamic demand patterns. In contrast, smart contracts provide a rich source of structured data that captures shipment obligations, pricing schemes, service-level agreements, penalties, and historical execution outcomes [4]. Leveraging this data, it becomes possible to algorithmically evaluate the economic and operational performance of any coalition of carriers.

**Goal.** Given a number of $N$ carriers, each of which has a set of smart contracts that include price and revenue terms, capacity commitments, penalties (delays, failures), counterparties, time windows, the goal is to propose a framework for maximizing the expected performance of the carriers. The framework will consist of two parts: its first part is used for endogenous construction of the characteristic function, based on the aggregation and simulation of smart-contract-defined interactions, and the second part forms the optimal coalition of the carriers.

**Characteristic function construction.** Function $v(C)$ is constructed and updated through eight successive steps, during which data extraction, feasibility, optimization, and aggregation are separated:

1. Extraction of smart contracts from the ledger as a mapping

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{\Theta}_1(\boldsymbol{B}), \tag{1}$$

where all smart contracts involving any carriers in the set $\{\overline{1,N}\}$ are retrieved from the distributed ledger (blockchain) $\boldsymbol{B}$. Each contract is parsed into a structured digital record containing participants, obligations, payments, penalties, and execution conditions [2, 4].

2. Normalization of contracts into a unified representation as a mapping

$$\tilde{\boldsymbol{S}} = \boldsymbol{\Theta}_2(\boldsymbol{S}), \tag{2}$$

where heterogeneous contracts are transformed into a standardized tuple format capturing operational and economic parameters. This ensures comparability and enables algorithmic processing. This makes the same output form for each contract with task (route, volume), revenue, penalty function, required capabilities, temporal constraints (time windows).

3. Construction of carrier capability profiles as a mapping

$$\Gamma = \{\gamma_n\}_{n=1}^{N} = \boldsymbol{\Theta}_3(\tilde{\boldsymbol{S}}), \tag{3}$$

where a capability vector (capacity, cost structure, service type, reliability) is constructed for each carrier. These profiles determine whether and how a coalition can execute contracts.

4. Coalition capability aggregation as a mapping

$$\gamma(C) = \bigoplus_{n \in C} \gamma_n = \mathbf{\Theta}_4(\Gamma, C), \tag{4}$$

where for each coalition, individual capabilities are aggregated into a coalition-level capability profile. The aggregation typical forms are addition (for capacity), maximization or minimization (for speed, reliability), and union (for service types).

5. Feasibility filtering of contracts as a mapping

$$\tilde{\boldsymbol{S}}_{\text{exec}}(C) = \mathbf{\Theta}_5(C, \tilde{\boldsymbol{S}}, \gamma(C)) \tag{5}$$

that determines which contracts can be executed by coalition $C$, based on whether coalition's capabilities satisfy the contract requirements.

6. Internal allocation of contracts within coalition as a mapping

$$\Psi(C) = \mathbf{\Theta}_6(C, \tilde{\boldsymbol{S}}_{\text{exec}}(C), \Gamma) \tag{6}$$

that assigns execution of each contract $\tilde{s}_{\text{exec}}$ in executable set $\tilde{\boldsymbol{S}}_{\text{exec}}(C)$ to carriers in coalition $C$, respecting capacity and minimizing cost. This is an internal optimization problem.

7. Evaluation of contract-level value as a mapping

$$\pi(\tilde{s}_{\text{exec}}, C) = \mathbf{\Theta}_7(C, \tilde{s}_{\text{exec}}, \Psi(C)) \tag{7}$$

that computes each contract $\tilde{s}_{\text{exec}}$ contribution to coalition value using revenue, cost, and penalties under optimal allocation.

8. Aggregation into a characteristic function as a sum

$$v(C) = \mathbf{\Theta}_8\big(\{\pi(\tilde{s}_{\text{exec}}, C)\}_{\tilde{s}_{\text{exec}} \in \tilde{\boldsymbol{S}}_{\text{exec}}(C)}\big) = \sum_{\tilde{s}_{\text{exec}} \in \tilde{\boldsymbol{S}}_{\text{exec}}(C)} \pi(\tilde{s}_{\text{exec}}, C) \tag{8}$$

that aggregates all contract-level values into a single scalar value for the coalition $C$.

So, for each coalition, contract data is integrated into a unified operational model as (1) — (7) that estimates achievable profit, cost savings, service reliability, and risk exposure [2, 4]. This allows the computation of (8) across the entire coalition lattice, including all $2^N - 1$ nonempty subsets of the carriers [3]. Therefore, the characteristic function by (8) is a derived functional of the blockchain state [1] by (1) — (7).

**Meta-coalitional stability.** Value (8) is time-dependent due to traffic changes, fuel prices change, demand fluctuations, etc., so the characteristic function by (8) is continuously updated. Hence, the optimal coalition should be determined in the quickest way. The optimality implies the maximization of the expected performance by (8). The Shapley vector of the coalition $\{\overline{1, N}\}$ is [3, 5]

$$\mathbf{S}(N) = [s_n]_{1\times N} \text{ by } s_n = \sum_{D \subseteq \{\overline{1, N}\} \setminus \{n\}} \frac{|D|! \cdot (N - |D| - 1)!}{N!} \cdot [v(D \cup \{n\}) - v(D)]$$

$$\text{and } v(\{\overline{1, N}\}) = \sum_{n=1}^{N} s_n, \tag{9}$$

where $v(\emptyset) = 0$, $v(C) > 0 \; \forall \; C \subseteq \{\overline{1, N}\}$ and $C \neq \emptyset$. Coalition $\{\overline{1, N}\}$ is stable if [3]

$$\sum_{n \in C} s_n \geqslant v(C) \text{ for any subcoalition } C \subseteq \{\overline{1, N}\}. \tag{10}$$

The Shapley vector for every subcoalition $C \subseteq \{\overline{1, N}\}$ is

$$\mathbf{D}(C) = [d_k^{(m_k)}]_{1\times|C|} \text{ by } \{m_k\}_{k=1}^{|C|} = C,$$

$$d_k^{(m_k)} = \sum_{F \subseteq C \setminus \{m_k\}} \frac{|F|! \cdot (|C| - |F| - 1)!}{|C|!} \cdot [v(F \cup \{m_k\}) - v(F)] \tag{11}$$

for every subcoalition $F \subseteq C \setminus \{m_k\}$ (i. e., where player $m_k \notin F$), $k = \overline{1, |C|}$. Generalizing vector (9) and stability inequalities (10) for vector (11), the subcoalition $C \subseteq \{\overline{1, N}\}$ is stable if

$$\sum_{m_k \in G} d_k^{(m_k)} \geqslant v(G) \text{ for any subcoalition } G \subseteq C \subseteq \{\overline{1, N}\} \text{ by } v(C) = \sum_{k=1}^{|C|} d_k^{(m_k)}. \tag{12}$$

Any trivial subcoalition, consisting of a single player $m$, i. e., when $C = \{m\}$, is always stable as then its Shapley vector (11) is just a number

$$d_1^{(m)} = \sum_{F \subseteq \emptyset} \frac{0! \cdot (1 - 0 - 1)!}{1!} \cdot [v(\emptyset \cup \{m\}) - v(\emptyset)] = v(\{m\}) \geqslant v(G) \; \forall \; G \in \{\emptyset, \{m\}\}.$$

A stable subcoalition $C^* \subseteq \{\overline{1,N}\}$ with Shapley vector

$$\mathbf{D}(C^*) = [d_k^{(m_k)^*}]_{1\times|C^*|}$$

is preferable for player $n$ with respect to a stable subcoalition $C$, where $n \in C^*$ and $n \in C$, if $d_k^{(n)^*} > d_l^{(n)}$, where $k$ is the order number of the player $n$ in the coalition $C^*$ and $l$ is the order number of player $n$ in coalition $C$. If there is a single preferable stable subcoalition (PSS) $C^* \subseteq \{\overline{1,N}\}$ then this is the solution maximizing the expected performance of the carriers. For a non-singleton set of $K$ PSSs $\{C_j^*\}_{j=1}^K$, a $K \times L$ payoff matrix $\mathbf{W} = [w_{jl}]_{K\times L}$ is constructed, where $L$ is the number of players participating in subcoalitions $\{C_j^*\}_{j=1}^K$, and

$$w_{jl} = v(\{m_{jl}\}) \text{ by } m_{jl} \notin C_j^* \text{ and } w_{jl} = d_{jk}^{(m_{jl})} \text{ by } m_{jl} \in C_j^*,$$

where $l$ is the order number of the player $m_{jl}$ with respect to PSS $C_j^*$, and $k$ is the order number of the player $m_{jl}$ in the vector $\mathbf{D}(C_j^*)$. Then the coalitional expected performance (CEP) $\overline{\mathbf{W}} = [\overline{w}_l]_{L\times 1}$ is maximized as

$$\overline{\mathbf{W}} = \mathbf{W}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{P}^{\mathrm{T}}, \mathbf{P} = [p_j]_{1\times K}, p_j \geqslant 0, \sum_{j=1}^{K} p_j = 1,$$

$$\max_{\mathbf{P}} \sum_{l=1}^{L} (1-\alpha)^{-1} (\overline{w}_l)^{1-\alpha} \text{ by } \alpha \in [0;1)\cup(1;\infty), \qquad (13)$$

where parameter $\alpha$ controls the balance between utilitarian (efficiency-driven for $\alpha = 0$, no concern for inequality) and egalitarian (fairness-driven for $\alpha > 0$ and $\alpha \neq 1$) coalition selection principles [3, 6, 7]. Finally, PSSs $\{C_j^*\}_{j=1}^K$ are selected with the probabilities in a vector $\mathbf{P} = \mathbf{P}^*$ such that the maximum in (13) is reached [6, 8]. This ensures the meta-coalitional stability for the case $K > 1$.

**Conclusion.** The presented framework relies on smart contract analytics and the optimal probability distribution over non-dominated stable coalitions (PSSs) that maximizes the $\alpha$-fairness objective in (13). It is particularly relevant for logistics platforms, freight marketplaces, and decentralized coordination systems, where autonomous agents interact through programmable contracts and require principled mechanisms for cooperation formation.

## References


1. Singh G. (2024). Blockchain-Based Smart Contracts: Technical and Usage Aspects. In: Kaushik K., Sharma I. (eds.). *Next-Generation Cybersecurity. Blockchain Technologies*, pp. 99–115. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1249-6_5
2. Romanuke V. V. (2026). Smart contracts in decentralized energy markets: opportunities and regulatory challenges. *Systems and Technologies*, Vol. 71, No. 1, pp. 107–117. https://doi.org/ 10.32782/2521-6643-2026-1-71.15
3. Peleg B. and Sudhölter P. (2007). *Introduction to the Theory of Cooperative Games*. Springer Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72945-7
4. Saberi S., Kouhizadeh M., Sarkis J., and Shen L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, Vol. 57, Iss. 7, pp. 2117–2135. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261
5. Романюк В. В. (2010). Програмний Matlab-модуль для визначення компонент вектора Шеплі в одній кооперативній грі з головним гравцем при двозначній характеристичній функції. *Наука й економіка*, Випуск 3 (19), с. 156–162.
6. Romanuke V. V. (2018). Acyclic-and-asymmetric payoff triplet refinement of pure strategy efficient Nash equilibria in trimatrix games by maximinimin and superoptimality. *KPI Science News*, No. 4, pp. 38–53. https://doi.org/10.20535/1810-0546.2018.4.131696
7. Romanuke V. V. (2018). Decision making criteria hybridization for finding optimal decisions' subset regarding changes of the decision function. *Journal of Uncertain Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 279–291. https://jus.worldscientific.com/pdf/jusVol12No4paper04.pdf
8. Fudenberg D. and Tirole J. (1991). *Game Theory*. MIT Press. https://linkmag.net/s/SPPaWfAV

# IMPROVEMENT OF A COMPREHENSIVE MODEL OF IRON ORE PELLET PRICE FORMATION BASED ON A CRM SYSTEM AND MACHINE LEARNING METHODS

**Ruban S., Kurganov I., Tron V.**
Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

**Abstract**. This paper addresses the problem of improving the accuracy of iron ore pellet price formation at mining and processing plants by combining analytical methods with machine learning. A modular system architecture is proposed, consisting of an operational CRM module and a supplementary analytical module. The operational module performs real-time price calculation based on a linear regression model built using the least squares method, and also ensures the accumulation of historical data in an Excel environment. The analytical module uses the generated dataset to train the model and assess the adequacy of the calculations. The simulation results obtained in the MATLAB environment show that the use of machine learning methods makes it possible to significantly reduce the prediction error: the RMSE value was reduced from 25.6 to 2.0, while the coefficient of determination reached 0.9738. It is demonstrated that the proposed approach improves pricing accuracy and can be used as a decision support system in the mining and metallurgical industry.

**Keywords**: iron ore pellets, pricing, regression model, least squares method, CRM, machine learning.

# УДОСКОНАЛЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ЦІНИ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ НА БАЗІ CRM-СИСТЕМИ ТА МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Рубан С., Курганов І., Тронь В.**
Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто задачу підвищення точності формування ціни залізорудних окатишів у гірничо-збагачувальних комбінатах шляхом поєднання аналітичних методів і машинного навчання. Запропоновано модульну архітектуру системи, яка складається з операційного модуля CRM та додаткового аналітичного модуля. Операційний модуль реалізує розрахунок ціни в реальному часі на основі лінійної регресійної моделі, побудованої методом найменших квадратів, а також забезпечує накопичення історичних даних у середовищі Excel. Аналітичний модуль використовує сформований dataset для навчання моделі та оцінки адекватності розрахунків. За результатами моделювання в середовищі MATLAB встановлено, що використання методів машинного навчання дозволяє суттєво зменшити похибку прогнозування: значення RMSE знижено з 25.6 до 2.0, а коефіцієнт детермінації становить 0.9738. Показано, що запропонований підхід забезпечує підвищення точності ціноутворення та може бути використаний у якості системи підтримки прийняття рішень у гірничо-металургійній галузі.

**Ключові слова:** залізорудні окатиші, ціноутворення, регресійна модель, метод найменших квадратів, CRM, машинне навчання.

**Introduction.** The pricing of iron ore pellets is a multifactorial process determined by market indicators, product quality, and contractual conditions [1–5]. Under the current instability of raw material markets, traditional approaches to price formation do not provide sufficient accuracy, which necessitates the application of mathematical modeling and machine learning methods [6-9].

In this regard, an important task is the implementation of mathematical models and machine learning methods that make it possible to improve calculation accuracy and automate the decision-making process.

The aim of this work is to develop a modular pricing system that combines a CRM module for real-time calculation and an analytical machine learning module.

**Price Formation Factors.** The main factors are shown in Figure 1.

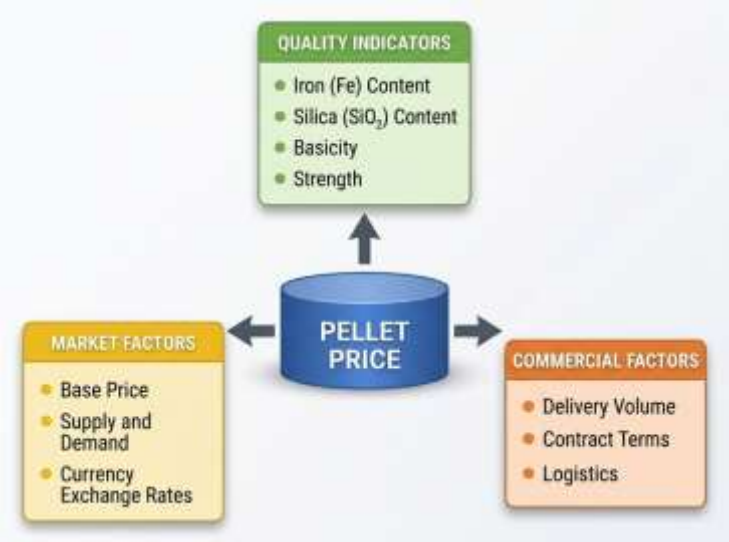



Fig. 1. Structure of the pellet price formation factors

The main variables of the model are $Fe$ – iron content; $SiO_2$ – silica content; $B$ – basicity; $Q$ – supply volume; $L$ – logistics costs.

The general structure of price formation is:

$$P = P_{base} + \Delta P_{quality} + \Delta P_{market} + \Delta P_{logistics},$$

where $P_{base}$ is the base price, $\Delta P_{quality}$ is the contribution of the pellet quality indicators, $\Delta P_{market}$ is the contribution of commercial factors to pricing, $\Delta P_{logistics}$ is the contribution of logistics costs.

**Mathematical Pricing Model.** This work uses a linear regression model that describes the dependence of price on the main factors. The linear regression model is formalized as follows:

$$P = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i \cdot x_i + \varepsilon.$$

In expanded form:

$$P = \beta_0 + \beta_1 Fe + \beta_2 SiO_2 + \beta_3 B + \beta_4 Q + \beta_5 L + \varepsilon,$$

where $x_i$ is the factors (quality, market), $\beta_i$ is the model coefficients, ε is the random error of the model.

The coefficients are estimated using the least squares method, which minimizes the sum of squared deviations between the actual and calculated values, so the optimization function has the form:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min.$$

Model quality criteria:
coefficient of determination:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

root mean square error:

$$\mathrm{R}MSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}.$$

The pricing system is implemented on a modular basis and consists of two interconnected subsystems: the operational and the analytical modules.

The operational module, integrated into the CRM system, provides functions for the manager to enter product parameters, instantly calculate the price based on the regression model, and save the results (Google Sheets tables, database) [11, 12].

The analytical module operates independently of the CRM and performs model training based on the accumulated data using machine learning methods, assessment of prediction accuracy, and the formulation of recommendations for updating the model parameters. This approach makes it possible to separate the tasks of operational management and analytics, which corresponds to modern principles of building enterprise information systems [13].

The organization of data in the system is based on the use of a historical information repository (a Google Sheets table or Excel, database), which contains the input parameters, the price calculated in the CRM, and the actual price formed as a result of transactions. The accumulation of such data ensures the formation of a representative dataset used to train machine learning models and to improve pricing accuracy.

**Simulation Results.** The simulation was carried out in the MATLAB environment [10]. The results of comparing the dynamics of pellet price formation using the operational CRM model (the current option) and the improved option with the regression model and the analytical module are shown in Fig. 2.

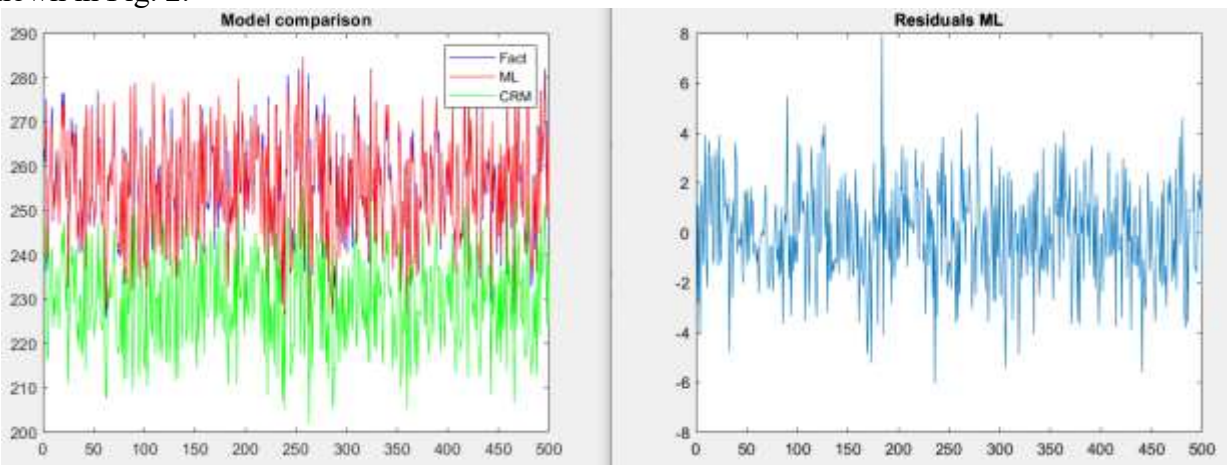



Fig. 2. Comparison of pellet price formation using the operational CRM model (CRM) and using the supplementary analytical module (ML), and the error between ML and the actual price value (Fact)

Analysis of the graphs showed that the predicted values obtained using the proposed regression model with ML optimization of the model coefficients almost coincide with the actual data, which is confirmed by the high value of the coefficient of determination ($R^2 = 0.9738$).

The obtained results:

- RMSE of the proposed system with the regression model and the analytical module performing optimization of the model coefficients (ML): 2.0;
- RMSE of the operational CRM model (CRM): 25.6;
- $R^2$=0.9738.

This indicates a significant improvement in prediction accuracy when using machine learning.

At the same time, the results of the operational CRM model show significant deviations, which is confirmed by the high RMSE value (25.6), which exceeds the corresponding indicator of the ML model (2.0) by more than 12 times.

This indicates the presence of a systematic error in the CRM model and the need to adapt it based on machine learning methods.

**Conclusions.** A mathematical model for pricing iron ore pellets has been developed. A modular system architecture combining operational and analytical modules (CRM + ML) is proposed, which provides an improvement in prediction accuracy of more than 10 times.

The obtained results can be used to create decision support systems in the mining and metallurgical industry.

## References


1. Qiu, G., Jiang, T., Fan, X., Li, G.: Prediction of iron ore pellet compressive strength using machine learning techniques. *Metals*, 11(8), Article 1274, (2021). https://doi.org/10.3390/met11081274.
2. Umadevi, T., Deodar, A.V., Mahapatra, P.C., Ranjan, M.: Influence of pellet basicity on metallurgical properties of iron ore pellets. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(5), pp. 519-528, (2020). https://doi.org/10.1080/03019233.2018.1511003.
3. Wang, Y., Guo, Z., Zhang, Y., Hu, X., Xiao, J.: Iron ore price prediction based on multiple linear regression models. *Sustainability*, 15(22), Article 15864, (2023). https://doi.org/10.3390/su152215864.

4. Pan, W., Liu, S., Kumral, M., D'Ariano, A.: Iron ore price forecasting using a multi-echelon tandem learning framework. *Natural Resources Research*, 33(2), pp. 781-799, (2024). https://doi.org/10.1007/s11053-024-10360-2.
5. Li, D., Moghaddam, M.R., Monjezi, M., Armaghani, D.J.: Forecasting iron ore prices using the Group Method of Data Handling (GMDH). *Applied Sciences*, 10(7), Article 2364, (2020). https://doi.org/10.3390/app10072364.
6. Bishop, C.M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, New York, 738 p., (2006). https://doi.org/10.1007/978-0-387-45528-0.
7. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.: *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. Springer, New York, 745 p., (2017). https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7.
8. James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R.: *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. 2nd ed. Springer, Cham, 607 p., (2021). https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1.
9. Kuhn, M., Johnson, K.: *Applied Predictive Modeling*. Springer, New York, 600 p., (2013). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6849-3.
10. MathWorks: MATLAB Regression Learner Toolbox Documentation [Electronic resource]. Available at: https://www.mathworks.com/help/stats/regressionlearner-app.html (accessed: 01.06.2026).
11. Kumar, V., Reinartz, W.: *Customer Relationship Management: Concept, Strategy, and Tools*. 4th ed. Springer, Cham, 366 p., (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-662-55381-7.
12. Chofreh, A.G., Goni, F.A., Klemeš, J.J.: Sustainable enterprise resource planning systems and Industry 4.0 integration. *Journal of Cleaner Production*, 248, Article 119290, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119290.
13. Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N.: Smart Manufacturing and Digital Transformation in Industry 4.0: State of the Art and Future Trends. *Machines*, 12(2), Article 95, (2024). https://doi.org/10.3390/machines12020095.
14. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R.: Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(1), pp. 83-111, (2022). https://doi.org/10.1142/S2424862221300040.
15. OECD: *Commodity Price Index Report*. Paris, (2023).
16. World Bank: *Commodity Markets Outlook*. Washington, (2024).
17. Platts Steel Markets Daily Report. S&P Global, (2023).

# CONSEQUENCES OF THE FUNCTIONING OF THE NEW COMPUTERISED TRANSIT SYSTEM (NCTS) FOR CUSTOMS LOGISTICS

**Rudenko V.[1], Moskvichova O.[2], Pohrishchuk H.[1], Holovai N.[1]**
[1]Vinnytsia Educational and Research Institute of Economics, West Ukrainian National University, Vinnytsia, Ukraine
[2]The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The article examines the impact of the New Computerized Transit System (NCTS) on customs logistics efficiency and integration. Using systemic and comparative analysis, the study identifies key operational principles and systematizes the consequences of NCTS implementation across technological, economic, and institutional dimensions. The research proves that NCTS increases transparency, reduces transit time and costs, and strengthens international coordination. However, challenges regarding technical complexity and digital competence remain. The theoretical significance lies in advancing digital transit concepts, while the practical value involves improving customs policies and adapting national systems to common transit standards for optimized logistics strategies.

**Keywords**: NCTS, customs transit, customs logistics, foreign economic activity entities, customs control, international trade.

**Introduction**. Digital transformation, specifically NCTS, is reshaping international trade and customs logistics. Operating under the Common Transit Procedure, NCTS integrates customs services through electronic declarations and unified guarantees. This study assesses how NCTS optimizes logistics by increasing transparency, reducing administrative barriers, and accelerating clearance. While the system enhances the competitiveness of national logistics chains and cuts operating costs, it also presents challenges in technical integration and digital competence. A comprehensive evaluation of NCTS is essential for adapting business processes to modern electronic standards and improving global supply chain efficiency.

**The purpose of the work** is to conduct a comprehensive study of the consequences of NCTS functioning on customs logistics, evaluating its impact through informational, technological, operational, economic, organizational, and international lenses to enhance the efficiency and integration of national customs systems into global supply chains.

**Formulation of the problem**. The rapid growth of international trade and the digital transformation of customs necessitate a scientific evaluation of how the implementation of NCTS impacts the efficiency and security of customs logistics, while addressing the technical, economic, and organizational challenges of adapting national systems to common transit standards.

**Solving the problem**. The resolution of the identified problem involves a systematic transition from traditional paper-based transit to the integrated digital environment of NCTS, which acts as a fundamental tool for modernizing customs logistics. This process is achieved through several strategic directions:

1. Digital and Technological Integration. The primary solution lies in establishing a unified information and communication platform that replaces physical documentation with electronic messages. By implementing national components connected to a central domain, customs authorities ensure real-time data exchange, eliminating information gaps and manual entry errors. This digital architecture allows for the generation of a unique Master Reference Number (MRN), enabling end-to-end monitoring of cargo movement across multiple borders.

2. Operational and Procedural Optimization. Solving the inefficiency of border crossings is addressed through the "single declaration" and "single guarantee" principles. This eliminates the need for repeated formalities at each transit point, significantly increasing the throughput capacity of checkpoints and reducing administrative delays. The introduction of simplified procedures for authorized operators, such as guarantee waivers, further balances state fiscal interests with the economic needs of the business community.

3. Economic and Institutional Adaptation. To mitigate the challenges of high investment costs and technical complexity, the solution requires a comprehensive approach to institutional capacity

building. This includes: Developing a robust IT infrastructure capable of 24/7 operation to ensure the continuity of logistics chains. Enhancing the digital competencies of both customs personnel and foreign economic activity entities through specialized training. Harmonizing national legislation with the Convention on a Common Transit Procedure to provide a predictable legal environment.

4. International Coordination and Risk Management. The problem of security and predictability is solved by strengthening international cooperation. NCTS enables integrated risk analytics and real-time monitoring, allowing customs services to detect fraud and smuggling without disrupting the flow of legitimate goods. In conclusion, the effective functioning of NCTS transforms customs logistics into a resilient, transparent, and highly efficient ecosystem, ultimately reducing transaction costs and increasing the competitiveness of international transport corridors.

**Conclusion**. NCTS is a key institutional and technological tool for the modernization of customs logistics within the common transit space, which significantly transforms approaches to the management of transit cargo flows, customs control, and interaction between customs authorities and entities of foreign economic activity.

The functioning of NCTS is based on a combination of the principles of digitalization, unification of information exchange, guaranteeing customs obligations, decentralized architecture with centralized coordination, and real-time monitoring. This model provides continuous electronic support for transit operations, increases transparency and controllability of the movement of goods, and creates the prerequisites for risk-based customs control without disrupting logistics flows.

For customs authorities, NCTS reduces administrative costs and increases the efficiency of control, and for foreign economic activity entities, it reduces the time and cost of transit procedures and increases the predictability of logistics. At the same time, the effectiveness of the system depends on the technical readiness and digital competencies of users, and its main limitations are the need for investments in the IT infrastructure, staff training, and stability of digital services functioning.

The consequences of the functioning of NCTS for customs logistics can be systematized according to informational and technological, operational and procedural, economic, organizational and institutional, and international dimensions. Taken together, these consequences form a qualitatively new level of management of the customs transit regime, contribute to the reduction of logistical barriers, increase the competitiveness of international transportation, and strengthen the integration of national customs systems into global logistics networks.

NCTS should be considered not only as a technical tool for electronic transit but as a comprehensive element of the digital customs infrastructure, which has a long-term strategic impact on the development of customs logistics, international trade, and economic integration. Further improvement of the functioning of the system requires a systemic approach aimed at developing the IT infrastructure, harmonizing the regulatory environment, and increasing the institutional capacity of all participants in common transit.

## References


1. M. Antov, “The Role of Information Technologies in the Development of Customs Control in the Republic of Bulgaria,” World Customs Journal, vol. 11, pp. 101-116, Sep. 2017, doi: 10.55596/001c.115706.
2. S. Pashova, “Electronization of the Bulgarian Customs Administration,” Customs Scientific Journal, vol. 7, no. 1, pp. 34-49, 2017.
3. A. A. P. Azcárraga, T. Matsudaira, G. Montagnat-Rentier, J. Nagy, and R. J. Clark, Customs Matters: Strengthening Customs Administration in a Changing World, USA: International Monetary Fund, 2022. [Online]. Available: https://doi.org/10.5089/9798400200120.071. Accessed: Jan. 27, 2026.
4. K. Mikuriya, Compendium of Best Practices in the Area of Transit, Brussels, Belgium: World Customs Organization, Jun. 2020, 123 p.
5. S. Dalton and B. Stosić, “The Importance of Applying Lean Innovation for Enhancing Harmonization of Customs Procedures in context of Digitalization of Customs Administration – A Case Study of

Serbia," Lex Localis – Journal of Local Self-Government, vol. 19, pp. 305-327, Apr. 2021, doi: 10.4335/19.2.305-327(2021).
6. V. Lebid, T. Anufriyeva, H. Savenko, and V. Skrypnyk, "Study of efficiency of simplification of customs formalities on the digitalization basis," Technology Audit and Production Reserves, vol. 1, no. 4(57), pp. 49-53, 2021, doi: 10.15587/2706-5448.2021.225627.
7. A. Erceg, "The New Computerized Transit System and eCustoms Influence on Savings in Transit Time and Costs," in Proc. 13th Int. Scientific Conf. Business Logistics in Modern Management, Osijek, Croatia, Oct. 17, 2013, pp. 143-152.
8. V. Fostolovych, L. Mykhalchyshyna, and Z. Simanaviciene, "International cooperation in the conditions of the NCTS joint transit system: in Ukrainian dimension," Public Policy and Accounting, vol. 1, no. 7, pp. 47-53, 2023, doi: 10.26642/ppa-2023-1(7)-47-53.
9. A. Grainger and J. Boelts, A Practical Guide to Cross-Border Facilitation. Vienna: Organization for Security and Co-operation in Europe (OSCE), Sep. 2025, 116 p.
10. R. Kril, "Common Transit Procedure and NCTS Implementation: the Case of Ukraine," Lex Portus, vol. 7, no. 3, pp. 32-59, 2021, doi: 10.26886/2524-101X.7.3.2021.2.
11. O. Ilchenko, "Common customs transit procedure for Ukraine: legal aspects," Visegrad Journal on Human Rights, no. 1, pp. 90-94, 2023, doi: 10.61345/1339-7915.2023.1.12.
12. A. I. Dusmukhametov, E. R. Bokiev, and A. A. Saidov, "The study of the transit system of the European Union and the features of the information system "E-Transit" of the Republic of Uzbekistan," Digital Transformation and Artificial Intelligence, vol. 1, no. 3, pp. 148-153, Oct. 2023.
13. European Commission, "New Computerised Transit System (NCTS)," Directorate-General for Taxation and Customs Union. [Online]. Available: https://taxation-customs.ec.europa.eu/online-services/online-services-and-databases-customs/new-computerised-transit-system-ncts_en. Accessed: Jan. 27, 2026.
14. F. Jane, NCTS: The New Computerised Transit System Made Easy, iCustoms.ai, Oct. 2023. [Online]. Available: https://www.icustoms.ai/blogs/ncts-new-computerised-transit-system/

# THE IMPACT OF AI ON CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABILITY

**Sandeep Kumar Gupta[1], Charvee Sanjana A.[2], Navya Sree M.S.[3,1], Saranya T.S.[2], Iryna Mihus[3], K. Jayadurga Prasad[1]**
[1]School of Commerce and Management, Mohan Babu University, Tirupati, India
[2]Head of the Institute, AIBHAS, Amity University, Bengaluru, India
[3]Scientific Center of Innovative Research OÜ, Estonia

**Abstract**. The fast evolution of artificial intelligence (AI) is transforming the sustainability agenda and accelerating the transition to a circular economy (CE). The CE paradigm challenges the linear "take, make, dispose" paradigm. Instead, it emphasizes the reuse of resources, minimizing waste, and encouraging regeneration. AI increases productivity, decision-making, and resource use in sectors such as manufacturing, agriculture, energy, and waste management. Globally, AI applications such as computer vision, machine learning, and predictive analytics enhance material productivity, energy efficiency, and waste segregation. AI-based energy management systems optimize consumption and use of renewable materials. Predictive maintenance minimizes waste and downtime. With a rising population and industrialization, AI provides enormous potential for sustainable development in India. Its application in irrigation and smart city initiatives is evident in government initiatives such as "AI for All" by NITI Aayog. Nevertheless, several issues persist, including a lack of qualified professionals, high costs of implementation, and inadequate data infrastructure. Effective governance, transparency, and intersectoral collaboration are critical to achieve environmentally sustainable and just outcomes. To tap the full potential of AI in facilitating CE principles, capacity-building investments are required. The integration of AI and circular economy models represents a significant leap forward in achieving sustainable and resilient economic growth for the global economy and developing economies such as India.

**Keywords**: Artificial intelligence, Circular Economy, Resource Optimisation, Sustainable Development.

**Introduction**. The study examines the increasing significance of Artificial Intelligence (AI) in advancing sustainability via the Circular Economy (CE). The old "take, make, dispose" linear models are no longer working because of more waste, fewer resources, and more environmental problems. The circular economy is all about using resources again, recycling them, and making them new again. AI is a key enabler because it makes things more efficient, helps people make better decisions, and helps businesses make better use of their resources in fields like agriculture, energy, and waste management.

**The purpose of the work.** The primary objective of this research is to examine the role of AI in facilitating the attainment of sustainability objectives via circular economy practices.

**Formulation of the problem**. Despite the potential of AI in supporting sustainability, several challenges hinder its effective implementation, such as limited awareness and adoption of circular economy practices, high cost and technical complexity of AI technologies.

**Solving the problem**. The research suggests multiple solutions to address these challenges, like Adoption of AI technologies, Policy support and government initiatives, Investment in skill development, Improvement in data infrastructure for better AI implementation, Collaboration between government, industry, and academia to ensure responsible and inclusive growth, Promotion of circular practices like recycling, reuse, and smart waste management using AI.

These solutions can help transition towards a sustainable and resilient economy by maximizing the benefits of AI in circular systems.

Based on Fig. 1, the data shows how much carbon dioxide is expected to be released each year from 2024 to 2030 in different situations. Over time, emissions go up steadily. By 2030, the highest scenario will reach about 44.1 Mt, while the lowest will stay around 24 Mt. The mid-case scenario shows moderate growth, which means that emissions are going up in a controlled way. The dotted trend line shows that people are trying to stabilize emissions, but the overall growth shows that stronger sustainability measures are needed.

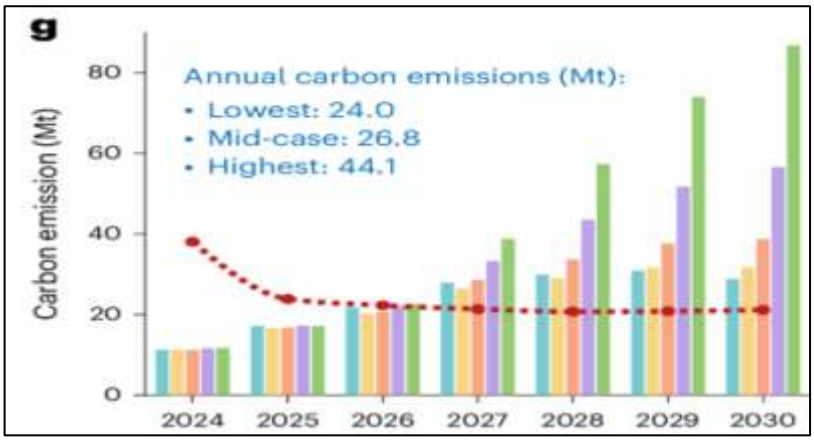



Fig. 1. Annual Carbon Emissions

The data in Fig. 2, shows that energy use will steadily rise every year from 2024 to 2030 in all scenarios. The most likely scenario shows a sharp rise, reaching about 244.9 TWh by 2030. The least likely scenario, on the other hand, grows more slowly. The mid-case shows that energy demand will grow steadily and at a moderate rate. Overall, the upward trend shows that energy needs are growing and that managing energy in a way that is both efficient and long-lasting is important.

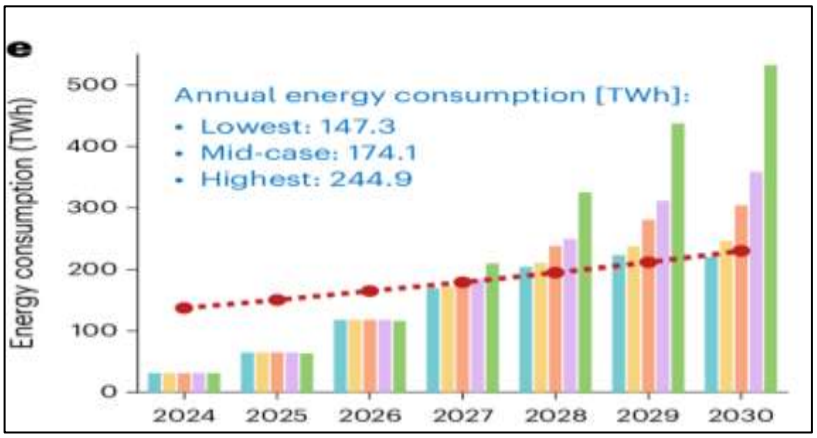



Fig. 2. Annual Energy Consumption

**Conclusion**. The study concludes that Artificial Intelligence (AI) plays a crucial role in promoting the Circular Economy (CE) and fostering sustainability. AI enables efficient use of resources, reduces waste, and improves energy management. This technology helps transition from a linear to a circular economic model. Applications like predictive analytics, machine learning, and smart systems show significant promise in areas such as agriculture, manufacturing, and waste management. These advancements lead to both environmental and economic gains.

However, the research also points out important challenges. High implementation costs, a shortage of skilled workers, and poor data infrastructure are major issues, especially in developing countries like India. To fully benefit from AI in sustainability, we need strong policy support, investment in skill development, and cooperation among government, industry, and academia. With the right approaches, AI can be a powerful tool for achieving sustainable and resilient economic growth.

## References

1. Noman, A. A., Akter, U. H., Pranto, T. H., & Bahalul, H. (2022). Machine Learning and Artificial Intelligence in Circular Economy: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review. arXiv preprint. arXiv
2. Acerbi, F., Forterre, D. A., & Taisch, M. (Year). Role of Artificial Intelligence in Circular Manufacturing: A Systematic Literature Review. Politecnico di Milano. Re-public

3. Bashynska, I., & Prokopenko, O. (2024). Leveraging Artificial Intelligence for Circular Economy: Transforming Resource Management, Supply Chains, and Manufacturing Practices. Scientific Journal of Bielsko-Biala School of Finance and Law, 28(2). Asej
4. Sikander, A. (2024). Artificial Intelligence and the Circular Economy: How AI Advances Waste Reduction. Green Environmental Technology, 1(2), 23-34. Research Corridor
5. Hosmani, A., & Mithun, D. J. (Year). Impact of AI on Sustainable Circular Economy: Harnessing Artificial Intelligence. EPRA Journals. EPRA Journals
6. Raja R., R., & Khanna, G. K. R. (2025). Life Cycle-Based Sustainability Assessment and Circularity Mapping for Packaging Materials: Integrating Artificial Intelligence. Journal on Artificial Intelligence, 7, 301-327. Tech Science
7. Artificial intelligence in support of the circular economy: ethical considerations and a path forward. (2022). AI & Society, 39, 1451-1464. SpringerLink
8. Artificial Intelligence and the Circular Economy: AI as a Tool to Accelerate the Transition. (2019). McKinsey & Company / Ellen MacArthur Foundation Report. Sustainability
9. Achal, D. K., & Vijaya, G. S. (2025). AI-Enhanced Circular Economy and Sustainability in the Indian Electric Two-Wheeler Industry: A Review. World Electric Vehicle Journal, 16(11), 638. https://doi.org/10.3390/wevj16110638
10. Aggarwal, R. K. (2024). Installation and Performance Evaluation of a Solar Steam Cooking System for 1500 Students in the Hills– A Case Study. Current World Environment, 18(3), 1337. https://doi.org/10.12944/cwe.18.3.33
11. Ahmed, A. H. (2025). Next-Gen Instrumentation: Enabling Smarter and Sustainable Engineering Solutions. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 13(6), 2515. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.72662
12. Annual report 2023/24. (2024). Veterinary Record, 195(4), 165. https://doi.org/10.1002/vetr.4636
13. Azer, M. A., & Samir, R. (2024). Overview of the Complex Landscape and Future Directions of Ethics in Light of Emerging Technologies. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 15(7). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.01507142
14. Benk, M., Kerstan, S., Wangenheim, F. von, & Ferrario, A. (2023). Twenty-Four Years of Empirical Research on Trust in AI: A Bibliometric Review of Trends, Overlooked Issues, and Future Directions. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2309.09828
15. Bhalla, N., Brooks, L., & Leach, T. (2023). Ensuring a 'Responsible' AI future in India: RRI as an approach for identifying the ethical challenges from an Indian perspective. AI and Ethics, 4(4), 1409. https://doi.org/10.1007/s43681-023-00370-w

# THE IMPACT OF AI IN CIRCULAR ECONOMY: A SYSTEMIC REVIEW OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT PRACTICES

**Sandeep Kumar Gupta[1], Donuru Threesha[1], Thavva Jyoshna[1], Saranya T. S[2], Iryna Mihus[3], Tamadipati Siddartha[1]**

[1]School of Commerce and Management, Mohan Babu University, Tirupati, India
[2]Head of the Institute, AIBHAS, Amity University, Bengaluru, India
[3]Scientific Center of Innovative Research OÜ, Estonia

**Abstract.** Artificial intelligence (AI) is transforming the circular economy (CE) by accelerating the shift from traditional linear models to resource-efficient and sustainable ones. AI helps improve waste management, supply chain transparency, and product design, enabling companies to reduce waste and extend product life cycles. AI also enables new business models like Product-as-a-Service, which promotes reuse and refurbishment. Real-time AI analytics improve decision-making and coordination in complex circular supply chains, enhancing efficiency and sustainability (Tongyodkaew & Songmuang, 2025). However, challenges such as the resource demands of AI infrastructure and risks of reinforcing linear habits remain (Tongyodkaew & Songmuang, 2025).

Simultaneously, this human resource management (HRM) research focuses on performance, employee engagement, and organisational adaptability. Recruitment, training, and compensation act as key factors to improve workforce productivity and outcomes (Chandra & Lobo, 2024). The boost of AI integration in HRM enhances talent management and organisational durability (Panda et al., 2023), but an extensive analysis of compensation and employee relations is still limited, and identifies the research gaps.

Together, AI's impact on the circular economy and Human Resource Management (HRM) highlight an integrated approach to sustainable, technology-driven organisational growth. This intersection offers promising pathways for environmental practices and stronger human capital management in future-ready businesses.

**Keywords:** Artificial Intelligence, circular economy, Human Resource Management, organisational adaptability, technology-driven organisational growth, Python programming.

**Introduction.** The growing environmental challenges of the 21st century, such as climate change, resource depletion, and waste accumulation, are driving a global transition from the traditional linear "take, make, throw away" economy to a more sustainable and renewable circular economy (CE) model. The CE framework supports sustainable development by reducing waste, using resources more efficiently, and extending product life cycles through practices such as reuse, recycling, recovery, and valorisation (Ronalter et al., 2022). In contrast to the linear approaches that rely on assumptions of unlimited resources, circular models emphasise closing material loops and deliberately managing waste at every possible stage of production and consumption.

"Artificial intelligence technologies such as machine learning, predictive analytics, natural language processing, and computer vision are fundamentally changing the way organisations collect, process, and use data to improve environmental and operational performance" (Bocken et al., 2022). AI improves resource efficiency by facilitating energy management, optimising logistics, and predicting the flow of materials (Özsoy, 2023; Soori et al., 2024). It also reduces waste through intelligent sorting and recycling systems (Snoun et al., 2025) and ensures transparency in the supply chain by tracking the origin of products and their environmental impact (Pal, 2023). For instance, AI-driven predictive maintenance reduces equipment failures (Hamasha et al., 2025) and material losses, while intelligent design tools support the development of long-lasting products that are easier to repair and more recyclable. Collectively, these applications allow organisations to shift from a reactive approach to a more proactive and adaptive management framework that is consistent with circular economy principles. Nevertheless, the human perspective on this technological and environmental transformation remains largely unexplored. While much of the existing literature concentrates on the technical and operational dimensions of AI and CE integration, the role of human resource management (HRM) as a central driver of organisational learning, innovation, and cultural change has received relatively limited attention.

Understanding how AI, CE, and HRM interact provides valuable insight into the socio-technical dynamics that support sustainable business transformation. The convergence of these three areas highlights that achieving circularity is not only a technical or environmental challenge, but also a human and organisational challenge. A comprehensive talent management strategy can create a technically competent and sustainability-focused workforce, accelerating the adoption of a circular economy. Alternatively, ignoring the human aspects of AI implementation can destabilise an organization's trust, ethical standards, and long-term sustainability.

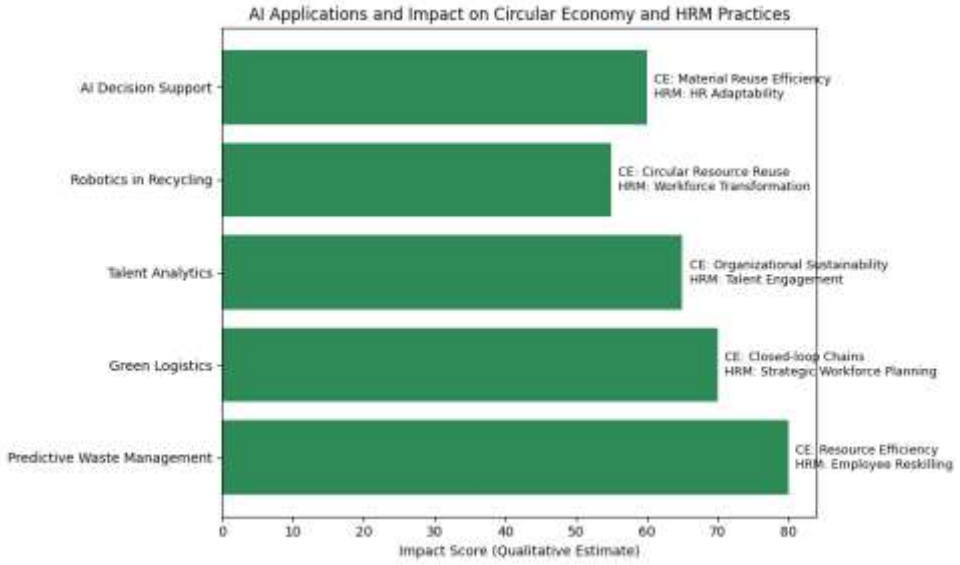



Fig. 1.

This literature highlights that the success of circular AI initiatives is extensively dependent on human capital readiness (Hassan, 2025). Human resources departments are evolving to align workforce skills with the requirements of digitalisation and sustainable transition (Shouraki et al., 2024).

**Recruitment and selection.** AI-powered recruitment tools use predictive analytics and skill-matching algorithms to facilitate candidate selection (Natarajan & Dhinakaran, 2024; Odili et al., 2024). However, ethical concerns regarding algorithmic bias and data privacy remain (Albassam, 2023; Hunkenschroer & Luetge, 2022).

Table 1. **Details of employees**

| | gender | ssc_p | hsc_p | hsc_s | degree_p | degree_t | workex | etest_p | specialisation | mba_p | status | salary |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | M | 67.00 | 91.00 | Commerce | 58.00 | Sci&Tech | No | 55.0 | Mkt&HR | 58.80 | Placed | 270000.0 |
| 1 | M | 79.33 | 78.33 | Science | 77.48 | Sci&Tech | Yes | 86.5 | Mkt&Fin | 66.28 | Placed | 200000.0 |
| 2 | M | 65.00 | 68.00 | Arts | 64.00 | Comm&Mgmt | No | 75.0 | Mkt&Fin | 57.80 | Placed | 250000.0 |
| 3 | M | 56.00 | 52.00 | Science | 52.00 | Sci&Tech | No | 66.0 | Mkt&HR | 59.43 | Not Placed | 0.0 |
| 4 | M | 85.80 | 73.60 | Commerce | 73.30 | Comm&Mgmt | No | 96.8 | Mkt&Fin | 55.50 | Placed | 425000.0 |

| Age | Business Travel | Depart | Education | Gender | Job Involvement | Job Satisfaction | Monthly Income | Total Working Hours | Years At Company | Total Working Years |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 41 | Rarely | Sales | Life Science | Female | 3 | 4 | 60,000 | 8 | 6 | 8 |
| 49 | Frequently | R & D | Life Science | Male | 2 | 2 | 40,000 | 10 | 10 | 10 |
| 37 | Rarely | R & D | Other | Male | 2 | 3 | 70,000 | 7 | 0 | 7 |
| 33 | Frequently | R & D | Life Science | Female | 3 | 3 | 95,000 | 8 | 8 | 8 |
| 27 | Rarely | R & D | Medical | Male | 3 | 2 | 80,000 | 6 | 2 | 6 |

**Performance analysis.**

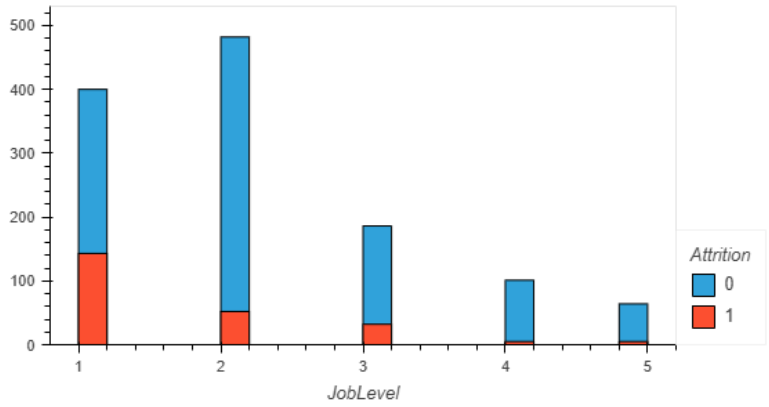



Fig. 2. Comparing job level to their performance

**Conclusion.** The findings of this systematic review reveal that artificial intelligence (AI) acts as a strong catalyst for enhancing the circular economy (CE) by optimal utilization of resources, boosting process efficiency, and improving sustainable innovation. Beyond technological advancements, the transition to a circular economy depends heavily on how effectively organisations manage their human capital (Patwa et al., 2022). This underscores the crucial role of human resource management (HRM) in enabling sustainable, AI-driven practices. AI facilitates circular economy goals through predictive analytics, intelligent manufacturing, and automated decision-making, which enhance operational performance and minimise waste (Rane et al., 2024). However, the success of these initiatives relies on the adaptability and readiness of the workforce (Oyekunle & Boohene, 2024). HR departments–particularly in recruitment, training, performance management, and compensation—must evolve to align employee competencies and motivation with digital transformation and sustainability priorities (Bristol-Alagbariya et al., 2024; Shouraki et al., 2024). Training programs mainly focus on digital literacy, data-informed decision-making, and environmental awareness. These are vital for developing a flexible workforce capable of thriving within AI-enabled circular systems.

The review further indicates that although AI enhances HR efficiency through automation and analytics, it also introduces ethical and managerial challenges. Concerns such as data privacy, algorithmic fairness, and employee resistance demand transparent governance and an inclusive workplace culture Moreover, executive commitment and continuous learning are emerging as essential elements to ensure that technology complements, rather than replaces, human potential (Singh & Pandey, 2024). Theoretically, this study enriches the discourse at the intersection of technology management, sustainable development, and human resource development. It highlights that technological and human systems must progress together for organisations to secure long-term sustainable advantage. In practice, AI-powered HRM systems can help organisations create green jobs, stimulate innovation, and nurture a sustainability-oriented culture aligned with CE principles (Korkosz-Gębska, 2025). Despite these insights, several research gaps remain. Empirical research is needed to measure the influence of AI-enabled HRM practices on circular performance outcomes. Going forward, researchers should dig into how this plays out differently across various industries and cultures—because context really matters. It would also be helpful to track companies over several years to see how bringing in AI actually affects people's well-being at work and whether it truly delivers on environmental promises over the long run.

In the end, bringing artificial intelligence and human capital management within the circular economy gives us the real shot at building organizations that are resilient, smart and truly sustainable organisations. When a company combines the digital tools with what matters to the people and the planet, they can spark the kind of innovation that benefits both their bottom line and the world we all share.

## References


1. Kurup Nair, P. (2024). Artificial Intelligence: A New Paradigm in Human Resource Management. International Journal of Artificial Intelligence in Business (IJAIB), 2(1), 1–6. Retrieved from https://iaeme.com/Home/article_id/IJAIB_02_01_001
2. Jabbour, C. J. C., & de Sousa Jabbour, A. B. L. (2019). Greening human resource management and the circular economy: A framework for sustainable organisational performance. Journal of Cleaner Production, 235, 1360–1372. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.003
3. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048
4. Adelakun, B. O., Antwi, B. O., Ntiakoh, A., & Eziefule, A. O. (2024). Leveraging AI for sustainable accounting: Developing models for environmental impact assessment and reporting. *Finance & Accounting Research Journal*, *6*(6), 1017. https://doi.org/10.51594/farj.v6i6.1234
5. Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Luthra, S., Majumdar, A., & Kazançoğlu, Y. (2021). An Exploratory State-of-the-Art Review of Artificial Intelligence Applications in Circular Economy using Structural Topic Modeling. *Operations Management Research*, *15*, 609. https://doi.org/10.1007/s12063-021-00212-0
6. Alapini, O. (2025). Implementing AI-Driven Performance Monitoring for Enhanced Decision-Making. *International Journal of Scientific Research and Modern Technology.*, 85. https://doi.org/10.38124/ijsrmt.v4i5.551

# A STUDY ON DREAM HACKING THROUGH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ELECTROENCEPHALOGRAM

**Saranya T.S. [1], Navisha Bajaj[2], Sambhav Kumar[2], Preetha D.V.[2], Saheen Nasreen[2], Shasirekha P.[2], Sandeep Kumar Gupta[3]**

[1]Amity Institute of Behavioural Health and Allied Sciences, Amity University Bengaluru, Karnataka, India

[2]Department of Clinical Psychology, School of Liberal Studies, CMR University, Bengaluru, India

[3]Mohan Babu University, Tirupati, India

**Abstract.** Dream hacking**,** an emerging interdisciplinary field, explores the potential of accessing and reconstructing dream content through advanced neurotechnology and artificial intelligence. This exploratory study investigates whether AI-generated images, based on EEG **(**electroencephalogram**)** data recorded during REM sleep, can accurately represent the visual content of individuals' dreams. A total of five participants were observed, with three able to recall their dreams (case group) and two unable to recall (control group). Participants' dreams were collected through post-sleep interviews and structured dream reports, and AI models were then used to create visual outputs from their corresponding EEG data. Findings indicate that participants who recalled their dreams rated the AI-generated images as highly accurate, with strong emotional and symbolic overlap between their dream narratives and the visuals. In contrast, participants with no dream recall gave lower accuracy ratings, suggesting a clear connection between subjective input and perceived image relevance. These results highlight the feasibility of combining EEG and AI for early-stage dream decoding and emphasize the role of dream recall in enhancing interpretive accuracy. While the sample size was small, the study provides valuable insight into how technology may bridge the gap between neural activity and subjective inner experiences.

**Keywords:** Dream Hacking, EEG, AI-generated Image, Dream Recall, Dream Reconstruction.

**Introduction.** Dreams are spontaneous mental events occurring mostly during sleep, which combine elements of sensory images, emotions, thoughts, and narratives. Dreaming occurs mostly in REM sleep, with dreams usually appearing to mimic waking consciousness but often not making much logical or surreal meaning themselves (Hobson, 2009). Each human dreams multiple times during the night, yet the frequency of dream recall and outright recall vary from person to person in differing degrees (Schredl & Reinhard, 2008). The interest of academicians, scientists, and philosophers in dreams has persisted for centuries; with the advancement of neuroscience, deeper investigations into their psychological and physiological bases have been attempted.

Dreams are also considered to be important for emotional regulation and memory consolidation. Memories relevant to emotional context are altered and stored when the subject sleeps, and sleeping (and REM sleep, in particular) brings about some regulating effects on the affective responses triggered by everyday stressors (Walker & van der Helm, 2009). Dreaming, within this context, can be considered a form of virtual reality wherein an individual might rehearse social interactions, come to terms with threats, or resolve emotional content left unaddressed (Revonsuo, 2000). On the other hand, cognitive neuroscientific findings have indicated that dreams aid in problem-solving and creativity, with some individuals claiming that new ideas or revelations have emerged from their dream experiences (Barrett, 2001).

Dream hacking is an exciting and rapidly growing field that blends cognitive neuroscience, sleep psychology, and technology. It focuses on the intentional influence or alteration of dream content while we sleep, using various external stimuli. This technique, often called targeted dream incubation (TDI), takes advantage of our brain's heightened sensitivity during sleep—particularly in light non-rapid eye movement (NREM) and rapid eye movement (REM) stages. By introducing cues like sounds, smells, or touch, we can shape the themes and structure of our dreams (Haar Horowitz et al., 2020). The idea has captured a lot of interest because of its potential uses in enhancing memory, providing therapeutic benefits, and even aiding in creative problem-solving. However, it also brings up important cognitive and ethical questions.

At the center of dream hacking is the brain's sensitivity to external stimulation during sleep, a process substantiated through neuroimaging and EEG research. When asleep in NREM or REM stages, the sensory cortices are still in a state of partial activity and are capable of detecting external inputs, although the waking consciousness is repressed (Nir & Tononi, 2010). This allows one to "talk" with the sleeping brain in subtle forms. One of the most high-profile examples in modern times is MIT's Dormio, a wearable device that measures the onset of hypnagogia (the sleep onset period) with biosignals like muscle tone and heart rate changes, and provides auditory feedback designed to shape dream imagery (Haar Horowitz et al., 2020). When these cues are presented to people while in a semi-conscious hypnagogic state, the dream story tends to include the material suggested, which can be remembered upon waking and attributed to outside stimuli.

The dream hacking framework also draws on the larger discipline of targeted memory reactivation (TMR), an approach that involves cueing learned material while one sleeps in order to reinforce memory consolidation. Although TMR initially targeted declarative memory (e.g., word pairs, place navigation), more recent variations have demonstrated that such cueing could also influence the emotional and thematic nature of dreams, thereby closing the gap between cognitive augmentation and experiential dream design (Oudiette & Paller, 2013; Cairney et al., 2018). For example, if a subject is taught to perform a task involved with a particular smell or noise, exposing the individual to the stimulus while sleeping can not only enhance performance on waking but can result in dream scenarios about the task.

Importantly, dream hacking has operations beyond experimental neuroscience. In the sphere of creativity, guided featuring has been shown to foster new sapience generation, analogical thinking, and cultural alleviation. Barrett (2001) proved multitudinous cases where musicians, mathematicians, and pens reported improvements that passed within dream countries, frequently following purposeful pre-sleep reflection or incubation ways. More lately, controlled dream incubation styles have been experimentally validated to enhance creative performance on tasks taking new use of objects or emblematic association (Haar Horowitz et al., 2020).

In clinical settings, dream hacking is being delved as a tool for internal health interventions, particularly in the treatment of post-traumatic stress disorder (PTSD) and habitual agonies. ways similar as Imagery Rehearsal Therapy (IRT) and lucid featuring remedy formerly aimed to rewrite disturbing dream content, and these may be stoked by external cueing systems that prompt mindfulness or content redirection during REM sleep (Spoormaker & van den Bout, 2006; Holzinger et al., 2015). Also, interventions using olfactory stimulation during sleep have demonstrated pledge in reducing the emotional impact of traumatic recollections decoded during waking (Hauner et al., 2013).

The growing sophistication of dream hacking has also piqued the interest of areas beyond psychology and neuroscience, such as marketing and ethics. In 2021, more than 40 prominent sleep scientists jointly signed an open letter cautioning against the misuse of TDI for commercial applications. The letter addressed growing industry interests in incorporating subliminal advertising into dreams, an action the authors labeled a serious threat to cognitive freedom and informed consent (Luna, 2021). Since dream states are characterized by decreased critical filtering and increased emotional processing, dreamers can be particularly susceptible to suggestive inputs while asleep. This not only makes dream hacking an immensely valuable tool but also a highly intrusive one, necessitating strong ethical controls and regulation.

**Conclusion.** This study explored the emerging field of dream hacking by integrating EEG data with AI-generated imagery to investigate whether it is possible to visually reconstruct dream content. Using an exploratory case-control design, participants who recalled their dreams provided detailed narratives, which were compared to AI-generated images based on EEG signals recorded during REM sleep.

The results indicate that participants who could recall their dreams perceived the AI-generated images as highly accurate, showing strong overlaps in visual elements and emotional content. The findings suggest that dream recall plays a crucial role in enhancing the interpretability of AI-generated images. In contrast, participants without dream recall found the AI-generated images

vague and less relevant, indicating that subjective input remains an essential complement to EEG-based AI interpretations.

## References


1. Barrett, D. (2001). The committee of sleep: How artists, scientists, and athletes use dreams for creative problem-solving—and how you can too. Oneiroi Press.
2. Barrett, D. (2017). Dreaming as a therapeutic modality. Dreaming, 27(4), 282–293. https://doi.org/10.1037/drm0000068
3. Buzsáki, G. (2006). Rhythms of the brain. Oxford University Press.
4. Bond, F. W., Hayes, S. C., Baer, R. A., Carpenter, K. M., Guenole, N., Orcutt, H. K., Waltz, T., & Zettle, R. D. (2011). Preliminary psychometric properties of the Acceptance and Action Questionnaire–II: A revised measure of psychological inflexibility and experiential avoidance. Behavior Therapy, 42(4), 676–688. https://doi.org/10.1016/j.beth.2011.03.007
5. Cairney, S. A., Guttesen, A. Á., El Marj, N., & Staresina, B. P. (2018). Memory consolidation is linked to spindle-mediated information processing during sleep. Current Biology, 28(6), 948–954.e4. https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.01.087
6. Cichy, R. M., Khosla, A., Pantazis, D., Torralba, A., & Oliva, A. (2016). Comparison of deep neural networks to spatio-temporal cortical dynamics of human visual object recognition reveals hierarchical correspondence. Scientific Reports, 6(1), 27755. https://doi.org/10.1038/srep27755
7. Domhoff, G. W. (2001). A new neurocognitive theory of dreams. Dreaming, 11(1), 13–33. https://doi.org/10.1023/A:1009464416649
8. Domhoff, G. W. (2011). The neural substrate for dreaming: Is it a subsystem of the default network? Consciousness and Cognition, 20(4), 1163–1174. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.03.013
9. Haar Horowitz, A., Fennell, J., & Llobera, J. (2020). Dormio: Interfacing with dreams to augment human creativity. Consciousness and Cognition, 83, 102955. https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.102955
10. Hayes, S. C., Strosahl, K. D., & Wilson, K. G. (1999). Acceptance and commitment therapy: An experiential approach to behavior change. Guilford Press.
11. Hayes, S. C., Luoma, J. B., Bond, F. W., Masuda, A., & Lillis, J. (2006). Acceptance and commitment therapy: Model, processes and outcomes. Behaviour Research and Therapy, 44(1), 1–25. https://doi.org/10.1016/j.brat.2005.06.006
12. Hauner, K. K. Y., Howard, J. D., Zelano, C., & Gottfried, J. A. (2013). Stimulus-specific enhancement of fear extinction during slow-wave sleep. Nature Neuroscience, 16(11), 1553–1555. https://doi.org/10.1038/nn.3527
13. Hobson, J. A. (2009). REM sleep and dreaming: Towards a theory of protoconsciousness. Nature Reviews Neuroscience, 10(11), 803–813. https://doi.org/10.1038/nrn2716
14. Hobson, J. A., & McCarley, R. W. (1977). The brain as a dream state generator: An activation-synthesis hypothesis of the dream process. American Journal of Psychiatry, 134(12), 1335–1348.
15. Hobson, J. A., Stickgold, R., & Pace-Schott, E. F. (2000). The neuropsychology of REM sleep dreaming. NeuroReport, 11(1), R1–R5. https://doi.org/10.1097/00001756-200001170-00001
16. Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural decoding of visual imagery during sleep. Science, 340(6132), 639–642. https://doi.org/10.1126/science.1234330
17. Holzinger, B., Klösch, G., & Saletu, B. (2015). Studies with lucid dreaming as add-on therapy to Gestalt therapy. Acta Neurologica Scandinavica, 131(6), 355–363. https://doi.org/10.1111/ane.12352
18. Lee, J., Choi, J., Lee, J. H., & Jung, K. (2024). NeuroNet: Hybrid self-supervised learning for sleep stage classification from EEG. arXiv preprint arXiv:2404.17585. https://arxiv.org/abs/2404.17585
19. Luna, T. (2021, July 6). Scientists warn of advertisers 'hacking dreams'. Science Magazine. https://www.science.org/content/article/scientists-warn-advertisers-hacking-dreams
20. Nir, Y., & Tononi, G. (2010). Dreaming and the brain: From phenomenology to neurophysiology. Trends in Cognitive Sciences, 14(2), 88–100. https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.12.001
21. Nishimoto, S., Vu, A. T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B., & Gallant, J. L. (2011). Reconstructing visual experiences from brain activity evoked by natural movies. Current Biology, 21(19), 1641–1646. https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.08.03
22. Oudiette, D., & Paller, K. A. (2013). Upgrading the sleeping brain with targeted memory reactivation. Trends in Cognitive Sciences, 17(3), 142–149. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.01.006

23. Revonsuo, A. (2000). The reinterpretation of dreams: An evolutionary hypothesis of the function of dreaming. Behavioral and Brain Sciences, 23(6), 877–901. https://doi.org/10.1017/S0140525X00003976
24. Schredl, M. (2003). Continuity between waking and dreaming: A proposal for a mathematical model. Sleep and Hypnosis, 5(1), 38–52.
25. Schredl, M., & Reinhard, I. (2008). Gender differences in dream recall: A meta-analysis. Journal of Sleep Research, 17(2), 125–131. https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2008.00626.x
26. Schredl, M. (2010). Characteristics and contents of dreams. International Review of Neurobiology, 92, 135–154. https://doi.org/10.1016/S0074-7742(10)92007-5
27. Stickgold, R., Hobson, J. A., Fosse, R., & Fosse, M. (2001). Sleep, learning, and dreams: Off-line memory reprocessing. Science, 294(5544), 1052–1057. https://doi.org/10.1126/science.1063530
28. Spoormaker, V. I., & van den Bout, J. (2006). Lucid dreaming treatment for nightmares: A pilot study. Psychotherapy and Psychosomatics, 75(6), 389–394. https://doi.org/10.1159/000095446
29. Walker, M. P., & van der Helm, E. (2009). Overnight therapy? The role of sleep in emotional brain processing. Psychological Bulletin, 135(5), 731–748. https://doi.org/10.1037/a0016570
30. Yu, C. K. (2020). The effectiveness of dream work on reducing PTSD symptoms: A systematic review. Journal of Trauma & Dissociation, 21(5), 587–604. https://doi.org/10.1080/15299732.2020.1785349

# ALGORITHM FOR IDENTIFYING FUNCTIONAL TYPES OF UKRAINIAN TERRITORIES VIA POWER BI

**Sryberko A.**
State Organization "Institute of Market and Economic & Ecological Researches of the National Academy of Sciences of Ukraine", Odesa, Ukraine

**Abstract.** The object of this research is the process of identifying and classifying the functional types of territories in Ukraine within the framework of modern regional policy. The purpose of the work is to develop and implement an automated algorithm for the spatial and economic assessment of territorial communities, ensuring objective categorization according to current legislative standards. The research objectives include the integration of diverse data sources (Open Data, GIS, and legal acts), the automation of tax capacity calculations, and the creation of a dynamic visualization system for decision-making support. The methods used in this study include geoinformation analysis (conducted in QGIS) to process OpenStreetMap and EEA Biogeographical regions data, and the World Database on Protected Areas, as well as business intelligence tools (Power BI) for ETL processes (Extract, Transform, Load). Automated data retrieval from the "Open Budget" portal was utilized to ensure real-time accuracy of financial indicators. The results demonstrate that the proposed algorithm significantly reduces the time required for territorial classification while minimizing human error. By synthesizing environmental data (forested and protected areas), socioeconomic indicators (population density, road networks), and legal statuses (mountainous or combat zones), the system provides a comprehensive digital twin of the regional structure. The practical implementation in Power BI allows for interactive monitoring and strategic planning, making it an essential tool for public administration in the context of post-war recovery and sustainable development.

**Keywords**: Functional types of territories, territorial communities, Power BI, QGIS, open data, Open Budget, automation, tax capacity.

**Introduction.** Modernization of state regional policy in Ukraine in the context of post-war reconstruction and sustainable spatial development requires highly effective mechanisms of administrative management and strategic planning. The legislative and structural foundations of this process are laid down by the Law of Ukraine "On the Principles of State Regional Policy" No. 156-VIII [1], which defines the strategic framework for ensuring territorial cohesion, economic convergence and decentralized public administration. Within the regulatory architecture of Law No. 156-VIII, the Cabinet of Ministers of Ukraine adopted Resolution No. 1493 of November 19, 2025 [2], which introduces specific quantitative criteria and socio-economic thresholds for the categorization of territorial communities by functional types, including recovery territories, regional growth poles, areas with special development conditions, or sustainable development areas.

Although these legislative and regulatory instruments contain a comprehensive matrix of public policy, they do not define a standardized computational process capable of performing automated processing of multi-source digital data. In real-world management scenarios, manual interpretation of dynamic demographic, financial, and spatial datasets leads to significant bureaucratic delays, subjectivity, and information fragmentation, which significantly complicates the timely allocation of resources. Consequently, developing an agile information technology methodology to automate the spatial identification and multidimensional profiling of territorial functional types represents an important scientific and practical task for modern management and regional economics.

**Formulation of the problem**. Despite significant progress in spatial data modeling, a substantial part of the overall problem remains unresolved in the field of Ukrainian spatial planning [3, 4]. In particular, existing methodologies do not eliminate systemic structural discrepancies between fiscal reporting systems that reflect parameters through local budget codes and geographic infrastructure layers that use the Codifier of Administrative-Territorial Units and Territories of Territorial Communities (KATOTTH). This gap prevents public administration systems from performing simultaneous multidimensional queries that combine, for example, spatial analysis of combat areas and temporarily occupied territories with multi-year analysis of the financial capacity

of communities. To overcome this technological limitation, this paper presents a unified data engineering architecture that combines these disparate classification schemes into a single automated framework.

**The purpose of the work** is to develop and implement an automated algorithm for the classification of functional territorial types by integrating heterogeneous data sources into a unified analytical system. The research aims to ensure the objective assessment of territorial communities through real-time data processing and interactive visualization using Power BI, thereby supporting evidence-based decision-making in regional policy.

**Solving the problem**. The operational effectiveness of the proposed analytical environment depends on the systematic collection of multi-source programmatic and legal data structured around normative criteria for classifying territories [2] The primary data collection pipeline automatically extracts legal and spatial features from official government registers and legislative acts. This includes up-to-date datasets on the administrative boundaries of communities, as well as comprehensive information on their assignment to areas of possible hostilities, rural, mountainous or other specific criteria and geospatial statuses defined by the current legislation of Ukraine. Financial parameters, which serve as basic metrics for calculating the economic capacity of communities, are systematically collected from the Open Budget portal through specialized application programming interfaces. To provide spatial analysis of object proximity and overlay of ecological layers, the system integrates geographic infrastructure layers from OpenStreetMap and global ecological vector datasets from the World Database on Protected Areas (WDPA) [5], and EEA biogeographical regions [6]. These integrated streams form the active analytical core of the framework, providing direct indicators for immediate territorial evaluation.

A separate stream of the data collection subsystem is the assimilation of unstructured text information from official legislative and regulatory acts. Utilizing Power Query programmatic pipelines (M-language), custom parsing and data structuring sequences were deployed to process official statutory schedules, in particular the List of combat areas and temporarily occupied territories [7], the List of settlements classified as radioactive contamination zones [8]), as well as the List of settlements granted the status of mountain settlements [9]. This processing stage ensures the transformation of textual legal statuses into structured data arrays with the assignment of local budget codes and KATOTTH identifiers for each settlement within the relevant communities.

The final stage of the methods includes data optimization and visual synthesis on a business analytics platform. To ensure fast web-based rendering of complex maps of territories without reducing system performance, vector shapefiles with high point density are converted to the lightweight TopoJSON format using specialized simplification tools that preserve topology. This optimization significantly reduces the file size while preserving the exact administrative boundaries of communities. The processed attributes and updated spatial models are then loaded into Power BI, where DAX logical conditional expressions are applied to assess each community's compliance with a comprehensive requirements matrix. This integrated architecture allows the system to automatically classify territories into categories of recovery territories, areas with special development conditions, regional growth poles, or sustainable development areas based on predefined mathematical conditions.

The general system architecture and data flow diagram of the territory classification framework are shown in Fig. 1.

**Conclusion.** The developed automated algorithm represents a significant shift from traditional manual reporting to a modern, data-driven approach in regional management. By integrating diverse datasets, ranging from real-time financial indicators from the Open Budget portal to complex geospatial data processed in QGIS, the system provides an objective and transparent mechanism for identifying the functional types of Ukrainian territories.

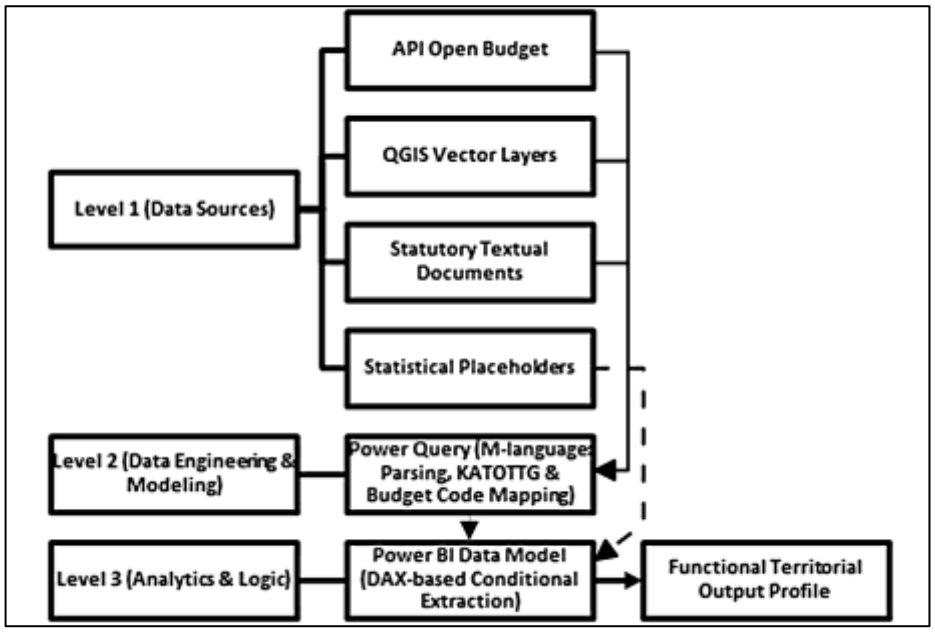


Fig. 1. System architecture and data flow diagram of the territorial classification framework

The practical application of the Power BI dashboard ensures that the classification of territorial communities remains dynamic and responsive to changes in the legislative and socio-economic environment. This tool not only simplifies the implementation of Resolution No. 1493 but also serves as a strategic asset for government agencies in planning post-war recovery and optimizing the allocation of state resources. Future development of the system could involve the integration of predictive analytics to forecast the transition of territories between different functional types based on economic trends. A promising direction in this context is the spatial determination of land resources for their reservation based on recreational and rehabilitation criteria, tailored to the specific attributes of each functional territory type.

## References

1. Verkhovna Rada of Ukraine: Law of Ukraine "On the Principles of State Regional Policy" no. 156-VIII (2015), https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-19?lang=en#Text, last accessed 2026/04/21.
2. Verkhovna Rada of Ukraine: Resolution "On Approving the List of Functional Types of Territories and Requirements for Indicators for Classifying Territories into Different Functional Types" no. 1493 (2025), https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1493-2025-%D0%BF?lang=en#Text, last accessed 2026/04/21.
3. Matviishyn Є. Г., Mykhailechko B. O., Mykhailechko H. B.: INFORMATION RESOURCES FOR SPATIAL DEVELOPMENT PLANNING OF TERRITORIAL COMMUNITIES. Public Administration and National Security 1(66), pp. 36–43 (2026).
4. Kalyna, T., Haisha, O., Riabenko, H.: INTEGRATION OF GEOSPATIAL DATA INTO THE ECONOMIC MANAGEMENT SYSTEM OF PROTECTED AREAS. Economy and Society (83), (2026).
5. The World Database on Protected Areas (WDPA), https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab=WDPA, last accessed 2026/03/17.
6. European Environment Agency (EEA): Biogeographical regions, Europe 2016, ver. 1, https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/srv/api/records/c6d27566-e699-4d58-a132-bbe3fe01491b, last accessed 2026/03/17.
7. Verkhovna Rada of Ukraine: Order "On approval of the List of territories where hostilities are (were) conducted or temporarily occupied by the Russian Federation" no. 376 (2025), https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0380-25?lang=en#Text, last accessed 2026/04/21.
8. Verkhovna Rada of Ukraine: Resolution "On the organization of the implementation of the resolutions [...]" no. 106a (1991), https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/106%D0%B0-91-%D0%BF?lang=en#Text, last accessed 2026/04/21.
9. Verkhovna Rada of Ukraine: Resolution "On the list of settlements which were given the status of mountain settlement" no. 647 (1995), https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/647-95-%D0%BF?lang=en#Text, last accessed 2026/04/21.

# THE ROLE OF GENERATIVE AI IN BUSINESS PROCESS REENGINEERING: A LANDSCAPE OF CURRENT RESEARCH

**Tarasenko L., Derun I.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

The study presents the results of a keyword co-occurrence bibliometric analysis of publications dedicated to the application of GenAI in Business Process Reengineering (BPR). Based on a sample of publications retrieved from Scopus in 2020-2025, five thematic clusters were identified: strategic digitalisation and innovation, technological drivers and socio-economic impact, organisational capabilities and adaptation, operational management and reengineering, and intelligent technologies and functional application. The bibliometric analysis indicates that GenAI is capable not only of optimising discrete process segments, but of radically transforming process logic itself, acting as a catalyst for reengineering. Existing studies document concrete effects of its application – resource savings, improved customer experience, and enhanced competitiveness. At the same time, the academic landscape remains fragmented, leaving considerable scope for further systematic research in this domain.

**Keywords:** business process reengineering (BPR), business-process, GenAI, bibliometric analysis.

**Introduction.** Generative Artificial Intelligence (GenAI) represents a paradigm of AI capable of producing bespoke content – ranging from text and imagery to video and executable code – in response to user prompts [1]. Distinct from conventional automation tools that merely accelerate extant workflows, GenAI acts as a catalyst for Business Process Reengineering (BPR) [2]. It facilitates a fundamental rethink and radical redesign of process logic to achieve dramatic improvements in speed, quality, service delivery, and cost optimisation. Specifically, within human capital management, GenAI is transforming recruitment workflows; in marketing, it revolutionises content synthesis and testing; and in accounting, it enhances data categorisation and analytics.

**Work goal.** The purpose of this study is to conduct a keyword co-occurrence bibliometric analysis of the extant literature concerning the impact of GenAI on BPR, retrieved from Scopus. This research seeks to identify key thematic clusters, emerging trends, and existing research gaps, thereby providing a comprehensive overview of the intellectual structure of the field.

**Formulation of the problem.** Despite the rapid adoption of GenAI in business practice, the theoretical foundation for its integration into BPR remains underdeveloped and fragmented. This gap stems from a prevailing focus in practical management on operational automation, whereas the academic community is only beginning to comprehend the profound micro- and macroeconomic implications of this phenomenon. Therefore, there is an urgent need to verify the structure of existing scientific knowledge to determine whether GenAI serves merely as a supplementary tool for extant BPR models or if it is already functioning as a catalyst for a new paradigm shift in business management, consistent with Thomas Kuhn's framework. The scientific novelty of this study lies in the identification of specific scientific directions within the studied domain, which allowed us to identify five thematic clusters. This allows the specification of the role of GenAI as a bridge between the study of various economic and social effects from the usual automation of routine operations to autonomous systems that can independently manage various business processes.

**Solving the problem.** To address this problem, a systematic literature search was conducted in Scopus [3] using the following key words: "business process reengineering" OR "business process management" OR "business process redesign" OR "process innovation" OR "business process optimization" OR "BPR" OR "BPT" OR "BPM" AND "generative AI" OR "GenAI" OR "generative artificiale intelligence" OR "AI agents" OR "synthetic business processes" OR "co-pilot for business analysts" OR "semantic mapping" OR "artificial intelligence" OR "AI" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "large language model" OR "LLM" OR "natural language processing" OR "NLP" OR "business intelligence" OR "BI" OR "robotic process automation" OR "RPA" OR "predictive analytics" OR "digital*" OR "Industry 4.0" OR "Industry 5.0". At this stage, a sample of 5,387 publications was formed. In the second stage, a time limit was imposed from 2020 to 2025, based on which the sample was reduced to 2996 publications. In the third stage, the sample was restricted to "Business, Management and Accounting", "Economics, Econometrics and Finance", and "Social Sciences", excluding all other fields. Based on these restrictions, the sample was reduced to 306 publications. The fourth stage limited the selection to

final-stage English journal articles published between 2020 and 2025. Based on this search string, a sample of 195 peer-reviewed articles was retrieved (as of 25 April 2026). To visualise the conceptual landscape of the research, a keyword co-occurrence cluster analysis was conducted using VOSviewer software (Fig. 1). This approach facilitates the transformation of an unstructured dataset into a coherent bibliometric map, where each cluster represents a specific functional dimension of GenAI application within BPR. Initially, VOSviewer identified 846 items (keywords). To optimise the clustering process and ensure analytical rigour, the following criteria were established: 1) minimum frequency (a threshold of at least 2 occurrences per keyword); 2) data cleaning (the implementation of a bespoke keyword thesaurus to ensure the semantic integrity of the bibliometric analysis); 3) cluster density (a minimum cluster size of 14 units). Based on these parameters, the 100 most influential items were selected for final mapping and interpretation.

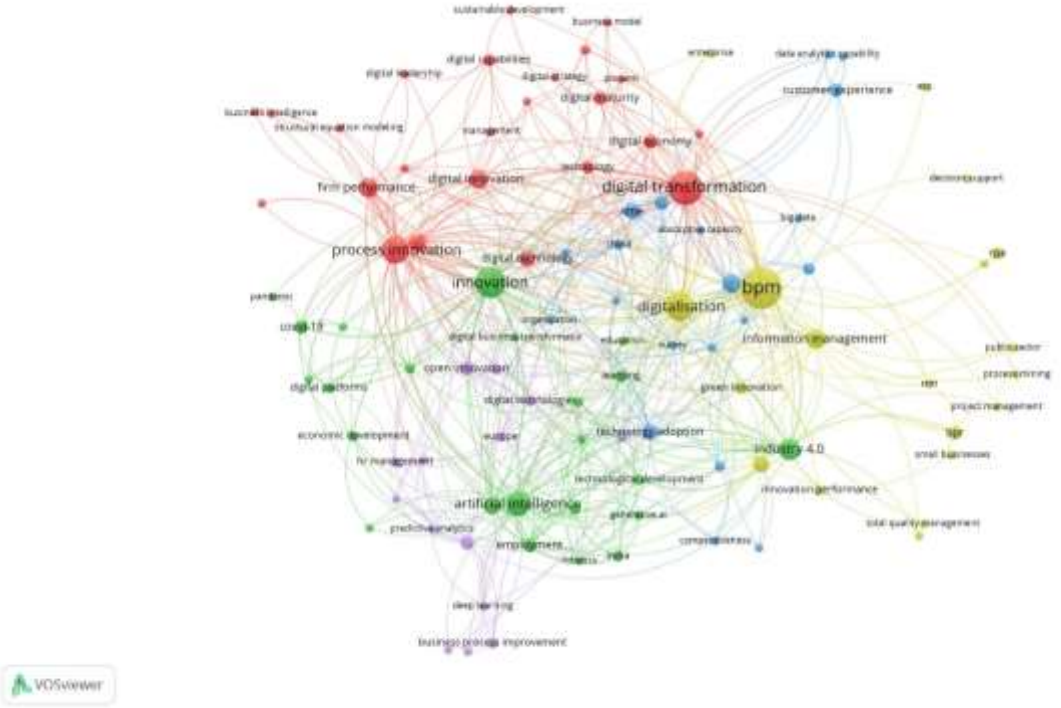



Fig. 1. Bibliometric keyword co-occurrence network map
*Source:* compiled by the authors using VOSviewer (as of 25 April 2026).

The analysis of the keyword co-occurrence network facilitated the identification and systematic evaluation of five distinct research clusters, as detailed in Table 1.

Table 1

**Composition and parameters of keyword clusters**

| Clusters | Keywords (TOP-3) | Occurrences | Total link strength |
|---|---|---|---|
| Cluster 1 (red) Strategic Digitalisation and Innovation | digital transformation | 30 | 89 |
| | process innovation | 19 | 64 |
| | firm performance | 10 | 29 |
| Cluster 2 (green) Technological Drivers and Socio-Economic Impact | innovation | 25 | 73 |
| | artificial intelligence | 16 | 44 |
| | industry 4.0 | 12 | 28 |
| Cluster 3 (blue) Organisational Capabilities and Adaptation | business processes | 9 | 20 |
| | SME | 7 | 13 |
| | technology adoption | 6 | 22 |
| Cluster 4 (olive) Operational Management and Reengineering (BPM/BPR) | bpm | 46 | 85 |
| | digitalisation | 22 | 62 |
| | information management | 10 | 25 |
| Cluster 5 (violet) Intelligent Technologies and Functional Application | machine learning | 5 | 18 |
| | open innovation | 5 | 12 |
| | business process improvement | 3 | 6 |

*Джерело:* створено авторами на основі VOSviewer.

*Cluster 1 (red)* forms the theoretical core of the research landscape, focusing on the concepts of digital strategy, leadership, and organisational maturity as the fundamental pillars for achieving high firm performance. This cluster integrates various methodological tools (bibliometric analysis, structural equation modelling, etc.) to examine the deployment of innovative business models and digital capabilities. The primary objective within this domain is to understand how firms adapt to the complexities of the digital economy while maintaining a focus on sustainable development.

*Cluster 2 (green)* explores the role of AI, specifically GenAI, as a global catalyst for the transformation of socio-economic relations, particularly in the post-pandemic era (COVID-19). The papers within this cluster are predominantly dedicated to labour market dynamics and the evolving requirements for digital skill sets across diverse geographical contexts. It highlights the broader societal implications of AI adoption and the subsequent shifts in global economic structures.

*Cluster 3 (blue)* focuses on internal firm resources, specifically dynamic capabilities and absorptive capacity, which serve as the primary determinants of successful technology implementation. This cluster also encompasses an analysis of the intricate links between big data, analytical potential, organisational culture, and risk management. It underscores that internal process agility and inclusivity are critical for the survival of Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) amidst intensifying global competition. Essentially, this domain highlights that the efficacy of GenAI is contingent upon an organisation's readiness to integrate disruptive innovations.

*Cluster 4 (olive)* is oriented towards the practical dimensions of business process automation, leveraging such instruments as ERP, CRM, RPA, and process mining, etc.

*Cluster 5 (violet)* is the most highly specialised, focusing on the technical implementation of innovations through machine learning, deep learning, and predictive analytics within applied domains (such as healthcare, engineering education, and human resource management); in these sectors, the deployment of chatbots and open innovation frameworks facilitates the creation of bespoke digital solutions tailored to specific industry-wide challenges.

**Conclusion.** The advancement of GenAI has driven a growing body of research into its application in process management and, in particular, BPR. Bibliometric analysis reveals the formation of several distinct thematic clusters associated with strategic digitalisation, operational management and process reengineering, technological drivers, and the functional application of technologies – reflecting the necessity of aligning different levels of management to achieve organisational goals.

GenAI is capable not only of optimising discrete process segments, but of radically transforming process logic itself – which is the very essence of reengineering. Empirical research confirms that it is through BPM capabilities – namely process automation, organisational learning, and innovative process transformation – that AI realises its potential and generates business value [4], [5].

Existing studies already document concrete effects: resource savings, improved customer experience, and enhanced competitiveness. At the same time, the academic landscape remains fragmented, leaving considerable scope for further systematic research in this domain.

The cluster analysis based on the bibliometric keyword co-occurrence network map allows for the identification of emerging technologies currently being studied within the economic and social sciences for BPR automation. Furthermore, it reveals critical 'blind spots' in existing research. These results systematize research directions, enabling business analysts to identify areas of increased risk (for example, personnel resistance, legal liability issues, unjustified costs, etc.) that must be considered when implementing BPR. Ultimately, this framework facilitates a transition from basic chatbots deployment to the development of complex, autonomous business process management systems, both in theoretical and practical terms.

## References


1. Stryker, C., & Scapiccihio, M. (2026). *What is generative AI?* IBM. https://www.ibm.com/think/topics/generative-ai
2. Masokoameng, B. Mofokeng, V., & Nyakala K. S. (2025). The impact of Industry 4.0 technologies on process reengineering: A case study review. *The 16th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, 205–208. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICMIMT65123.2025.11092197
3. Donthu, N., Kumar S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133. 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070
4. Zebec, A, & Indihar Štemberger, M (2024). Creating AI business value through BPM capabilities. *Business Process Management Journal*, 30 (8), 1–26. https://doi.org/10.1108/BPMJ-07-2023-0566
5. Ryzhko, O., Krainikova, T., Vodolazka, S., & Sokolova, K. (2024). Generative AI changes the book publishing industry: reengineering of business processes. *Communication & Society*, *37*(3), 255-271. https://doi.org/10.15581/003.37.3.255-271

# SOCIAL SYSTEMS PERSPECTIVE ON DECISION-MAKING FOR TRANSPORT ROUTE FORMATION BASED ON FUZZY LOGIC

**Trunova O.[1], Dorosh M.[1], Trunov O.[1], Voitsekhovska M.[1], Haferkorn P.[2]**
[1]Chernihiv Polytechnic National University, Shevchenko str., 95, 14035 Chernihiv, Ukraine
[2]Hochschule Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Science, Sankt Augustin CO 53757, Germany

**Abstract**. This paper presents an adaptive multilevel model of a decision support system for logistics routing in high-risk border regions. The research is based on the integration of fuzzy logic, N. Luhmann's social systems theory, and the Cognitive LLM-Agent to overcome the rigidity of traditional algorithms. The proposed architecture includes four levels: routine, convergence, cognitive, and bifurcation.

The use of a cognitive agent ensures semantic verification of data across temporal, social, and fact dimensions of meaning, enabling the implementation of a Hard Veto mechanism to filter out unreliable information. The mathematical core (AI Core) ranks alternatives using Fuzzy AHP, SAW, and TOPSIS methods with dynamic adaptation of factor weights. At the bifurcation stage, a Soft Veto mechanism is implemented, allowing the human operator to account for informal cognitive factors. The model ensures continuous enrichment of the knowledge base through a feedback loop and guarantees the unconditional priority of human safety over the economic efficiency of routes.

**Keywords:** Decision Support System, DSS, Logistics Routing, Fuzzy Logic, Cognitive LLM-Agent, Risk Management.

**Introduction.** Logistical management of the cargo delivery process is aimed at finding optimal vehicle routes that ensure delivery in the shortest possible time with minimal financial costs. Traditional approaches to solving routing optimization problems face serious challenges in border regions, where risk factors (shelling, landmines, and activities of sabotage groups) are characterized by their hidden nature and high dynamics of change.

In addition to technical and economic factors, modeling must consider for socio-systemic factors that significantly influence decision-making processes. Chevolini and Esposito [1] studied the social aspects of risk modeling and pointed out a number of problems associated with algorithmic forecasts: the entrenchment of past biases, the inability to verify a forecast until the event occurs, the active shaping of the future through algorithmic intervention, and the "self-fulfilling prophecy" effect. All mentioned factors necessitated the expansion of approaches to the collection, processing, and updating of knowledge in logistics decision support systems (DSS).

**The purpose of the work.** The aim is to develop an adaptive multi-level DSS model for logistics routing under risk conditions. The study integrates fuzzy logic, social systems theory, and the Cognitive LLM-Agent to overcome algorithmic rigidity and create a mechanism that prioritizes human safety over economic benefit.

**Formulation of the problem.** For systematic analysis, the route state is described as a vector of objective states $P$:

$$P = \{P_S, P_E, P_T\},$$

where $P_S$ – safety acceptability, $P_E$ – economic feasibility, $P_T$ – technical feasibility.

The socio-cognitive profile, including the "Sensemaking" indicator [2], is proposed to be taken outside the state vector and used as a meta-parameter. In this interpretation, $P_{cog}$ becomes a weight operator or a filter-function that determines how exactly the expert interprets the components of $P$ in a specific context. Mathematically, this can be expressed as a weighted evaluation:

$$R = \Phi\left(P, W\left(P_{cog}\right)\right),$$

where $W(P_{cog})$ is a vector of weight coefficients formed through the lens of the expert's cognitive attributions. This approach prioritizes human safety over economic benefit.

**Solving the problem.** The proposed model accounts the influence of social interaction and expert experience in decision-making through a multi-level architecture, which combines the

computational power of AI with the expert's "Sensemaking".

The model is based on Luhmann's theory of organization as the communication of decisions [3]. Decision-making is presented as an act of choice attributed to the logistics specialist, which allows for overcoming "undecidable problems" (according to von Foerster) when purely algorithmic methods are insufficient [4]. The proposed model includes four sequential levels.

1. *Routine level*. Primary attributions – the subjective views of observers, which often contradict one another – are accumulated. The traditional mechanical integration of this data is ineffective due to the emergence effect, whereby the combination of economic, security, and social factors gives rise to new systemic properties that cannot be predicted in advance. Constant updates to the context – such as the dissonance between objective calculations and the actor's subjective negative experience – radically alter the situation in real time. The result of this stage is a primary knowledge base that preserves the full complexity of the situation without losing important details. To structure it, decentralized Cognitive LLM-Agents are employed, which transform the accumulated data into a semantically rich information query based on the vector of objective states $P = \{P_S, P_E, P_T\}$. This allows the system to account for the full range of input factors for their subsequent convergence.

2. *Convergence level*. Semantic verification of attributions and their substantive convergence is performed across three dimensions of meaning according to Luhmann. The Cognitive LLM-Agent performs data consistency analysis across temporal (infrastructure stability – event variability), social (logistics decision – driver refusal), and fact (action execution – experience and sensemaking) dimensions. A high degree of convergence among these indicators minimizes systemic uncertainty and significantly enhances the realism of the object's state description. A characteristic feature of this stage is the linguistic formalization of parameter significance and confidence without direct calculations, where the Agent assigns priority labels to criteria and evaluates the reliability of information through an internal logical context check.

To filter out contradictory or critically dangerous data, the agent applies a logical safeguard – the Hard Veto mechanism, which is formalized as the following system:

$$V_{hard} = \begin{cases} 0, & if\ P \geq P_{crit} \ \vee \ EC > EC_{crit} \\ 1, & ortherwise \end{cases},$$

where $P$ is the objective state vector (e.g., risk level or technical threat); $P_{crit}$ is the threshold for the feasibility of further modeling; $EC$ (Expert Confidence) – linguistic confidence based on semantic convergence; $EC_{crit}$ – the reliability threshold below which an information request is identified as compromised or excessively contradictory. This approach ensures that only verified, consistent, and structured knowledge is fed into the mathematical core (AI Core), ready for further phase-based processing and decision-making.

3. *Cognitive level*. Semantic uncertainty is transformed into a structured mathematical knowledge base. The process involves a transition from linguistic descriptions to quantitative fuzzy estimates, resulting in an ordered set of alternatives $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. The final result of the automated stage is not a single "ideal" solution, but an ordered list of alternatives.

The AI Core implements a hierarchical structuring of factors and sub-factors. Their significance is calculated with the Fuzzy AHP method, which allows the mathematical justification of the priority of each system component under uncertainty.

Each factor corresponds to a scale of linguistic variables, which allows for the formalization of expert judgments in the form of triangular fuzzy numbers: $\tilde{p} = (l, m, u)$. This ensures the formation of flexible scales $\widetilde{w}_j$, which reflect not only the importance of a parameter but also the range of possible deviations. The weights generated by the core dynamically adapt based on the confidence indicator received from the cognitive agent at the previous level: $\widetilde{w}_j^* = EC \otimes \widetilde{w}_j$. This synergy allows the system to self-regulate: at a high confidence level ($EC \to 1$), fuzzy sets narrow to enable unambiguous decisions, whereas under conditions of cognitive dissonance (low $EC$), the intervals $[l, u]$ expand proportionally. This automatically increases the model's conservatism and strengthens the effect of safety filters, blocking risky decisions when data reliability is insufficient.

Based on a verified Knowledge base, AI Core calculates the priority of alternatives using two algorithms:

- Fuzzy SAW performs additive aggregation to obtain an integral score $\tilde{S}_i = \oplus_{j=1}^{n} (\tilde{p}_{ij} \otimes \tilde{w}_j^*)$;
- Fuzzy TOPSIS determines the relative proximity coefficient to the positive-ideal solution.

The final stage involves the LLM-Agent functioning as Explainable AI (xAI). It interprets the mathematical ranking results, verbally justifying the logic behind the selection of specific routes. This allows the logistics specialist as a "second-order observer" to verify the set of solutions (Include/Exclude possibilities) and make the final choice based on a combination of computational accuracy and personal experience (sensemaking).

4. *Bifurcation level*. This is viewed as the point where the final decision is made, and there is no turning back. Despite the high computational efficiency of the mathematical core in generating alternatives, personal responsibility for the final choice and action rests entirely with the specialist – the human cognitive operator (logistics specialist). At this level, a flexible division of functions is implemented: analytical support is delegated to the system, while ethical and professional oversight is entrusted to the human. The logistician serves as the final guarantor of safety, possessing the authority to impose a "cognitive stop valve" (Soft Veto) even on alternatives with high mathematical ratings. This decision is based on informal factors – $P_{cog}$ (intuitive sense of threat, specific experience, distrust of the data source), which are integrated into the final assessment of the priority of the alternative: $R_i^{final} = R_i \cdot v_{exp}(P_{cog})$, where $R_i$ is the mathematically calculated priority of the alternative (the result of the cognitive level); $v_{exp}(P_{cog})$ – is the expert veto function. If the logistics specialist accepts the decision, the $v_{exp} = 1$. If a Soft Veto based on cognitive dissonance is applied ($P_{cog}$), $v_{exp} = 0$, which instantly resets the priority of even the most advantageous route to zero. This mechanism instantly nullifies the priority of any route if it contradicts expert "Sensemaking".

Upon operation completion, the Cognitive LLM-Agent records the approved decision and the semantic justification for the veto applied, to the system memory. This ensures context updating and the formation of a feedback loop, which transforms the specialist's single cognitive experience into a new rule for future routine operations.

**Conclusion.** The developed adaptive multi-level DSS model shifts logistics decisions from the realm of intuition and experiences to rational, experience-based choice considering the social interaction factors' influence. The integration of Luhmann's concepts, Fuzzy logic, and the LLM-Agents successfully eliminates the algorithmic rigidity of deterministic systems.

## References


1. Cevolini, A., Esposito, E.: Does proactivity affect insurance solidarity and individual responsibility? The British Journal of Sociology 76(2), 245–261 (2025). https://doi.org/10.1111/1468-4446.13230.
2. 2. Weick, K.E.: Mann Gulch revisited: Improvisation as a surface of apprehension. Academy of Management Discoveries 10(1), 1–14 (2024). https://doi.org/10.5465/amd.2024.0006.
3. Luhmann, N.: Organization and Decision. Edited by Dirk Baecker. Cambridge University Press. (2018).
4. Heinz von Foerster, H.: Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition. Springer, New York (2003). https://doi.org/10.1007/b97451.

# USING MACHINE LEARNING METHODS TO PREDICT THE CORPORATE DEBT SUSTAINABILITY

**Veres O., Ilchuk P., Kots O., Veres Yu.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract.** This study proposes a conceptual and empirical framework for forecasting corporate debt sustainability using a hybrid approach that integrates financial econometrics and machine learning methods. The model combines financial, macroeconomic, and governance factors into a unified analytical system and introduces the Debt Sustainability Index (DSI) as a continuous measure of a company's ability to service debt, maintain financial equilibrium, withstand macroeconomic shocks, and preserve access to external financing. The empirical implementation follows a supervised learning framework using algorithms such as Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machines, and Neural Networks. The study further incorporates SHAP-based interpretability tools to address the "black-box" limitation of machine learning models and enhance decision-making transparency. The proposed framework contributes to improving early warning systems of financial distress and supports more informed managerial, credit, and investment decisions under conditions of economic uncertainty.

**Keywords:** machine learning, corporate debt sustainability, Debt Sustainability Index, financial distress prediction, nonlinear models, early warning systems

**Introduction.** Corporate debt sustainability prediction has significant importance to a wide range of stakeholders. Contemporary scientific approaches to assessing corporate debt sustainability are traditionally based on the use of financial ratios and discriminant models. However, classical models may demonstrate limited effectiveness under conditions of complex economic change, and their ability to account for macroeconomic factors, shifts in market conditions, or industry-specific differences is significantly constrained. Thus, a methodological gap exists between traditional financial risk assessment methods and the need for comprehensive forecasting tools capable of integrating both financial and macroeconomic factors.

**The purpose of the work** is to develop a conceptual model for forecasting corporate debt sustainability that integrates a systemic analysis of debt burden determinants with the application of machine learning methods to build a predictive model.

**Formulation of the problem**. A specific objective of the study is to provide a qualitative justification for the selection of key factors determining corporate debt sustainability and to establish causal relationships among them.

**Solving the problem.** A number of theoretical models for identifying corporate debt sustainability have been proposed in the scientific literature [1-17]. The most widely used among them include the Trade-off Theory, the Pecking Order Theory, and Dynamic Models of Corporate Leverage. In recent years, machine learning methods have been increasingly applied to predicting financial risks and bankruptcy. Compared to traditional statistical models, machine learning algorithms demonstrate higher predictive accuracy due to their ability to capture nonlinear relationships and complex interactions among financial variables [3, 13].

Empirical studies show that machine learning models often outperform traditional discriminant and logistic models used in classical approaches to financial distress prediction. For instance, Barboza, Kimura, and Altman [3] conducted a comparative analysis of various machine learning algorithms and traditional statistical models and found that ensemble methods, particularly Random Forest and Gradient Boosting, provide higher accuracy in predicting corporate bankruptcy compared to models such as the Altman Z-score. Similar results have been obtained in other studies, confirming the potential of machine learning for developing more effective early warning systems of corporate financial instability [11, 12, 17].

A key issue in related research is model interpretability. Many machine learning algorithms, particularly ensemble models and neural networks, are characterized by high predictive accuracy; however, they are often considered so-called "black-box" models, which complicates the interpretation of obtained results. In the field of financial risk management and credit analysis, this

creates additional challenges, as governance and lending decisions require a clear understanding of the factors determining the level of risk [4].

The development of a conceptual model for predicting corporate debt sustainability involves the integration of financial, macroeconomic, and governance factors into a unified logical system that enables qualitative assessment of default risk and prediction of debt sustainability levels. The model consists of three interrelated blocks: input data (predictors), the debt sustainability assessment process, and output results (outcomes). Each block reflects key mechanisms shaping corporate debt sustainability and is supported by both theoretical and empirical foundations.

The proposed model assumes a multi-level system of causal relationships between groups of factors and the resulting indicator of debt sustainability (Fig. 1).

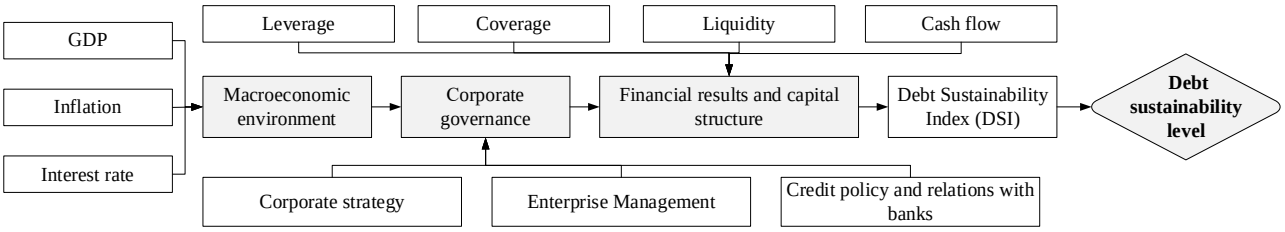



Fig. 1. Logic of interaction of corporate debt sustainability factors

The model has a hierarchical and simultaneously interactive structure, where external shocks affect financial indicators, while governance factors modify the strength of these effects.

Methodologically, the DSI has a multifactor structure with variables grouped into three blocks: financial factors, macroeconomic factors, and governance factors. The index can be represented as a function of the form:

$$DSI_i = f(FIN_i, MACRO_t, GOV_i), \quad (1)$$

where $FIN_i$ – vector of corporate financial factors (indicators), $MACRO_t$ – vector of macroeconomic factors for the period $t$, $GOV_i$ – vector of governance factors.

The DSI is recommended to be calculated using the following formula:

$$DSI_{it} = \beta_1 FIN_{it} + \beta_2 MACRO_t + \beta_3 GOV_{it}, \quad (2)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1. \quad (3)$$

At the same time, there are interdependencies among the factors, including the following:

- Leverage × Liquidity – a compensatory effect;
- Leverage × Interest Rate – an amplifying effect;
- Profitability × GDP Growth – a pro-cyclical effect;
- FX × Foreign Debt Share – a nonlinear effect.

Thus, the DSI has the potential to capture both additive and interactive effects. In the proposed model for predicting corporate debt sustainability, the DSI serves not only as an aggregated indicator of financial stability but also as an input variable in machine learning models designed to predict the probability of financial distress or debt instability.

The proposed conceptual model for predicting corporate debt sustainability can be implemented using machine learning methods that allow for the modelling of complex and nonlinear relationships among financial, macroeconomic, and governance factors. Unlike traditional econometric models, machine learning algorithms do not require strict assumptions regarding the functional form of relationships between variables and are capable of capturing interaction effects among predictors.

The empirical implementation of the model follows a supervised learning framework, in which the DSI and related indicators of financial distress serve as target variables, while financial ratios, macroeconomic indicators, and governance variables act as explanatory features.

Machine learning structure for predicting corporate debt sustainability includes 6 Blocks:

- Block 1. Data sources – include financial data (leverage ratios, liquidity ratios, profitability indicators, coverage ratios, firm size), macroeconomic data (GDP growth rate, policy interest rate, inflation rate, exchange rates – optional), governance data (indicators of management quality assessment, ownership structure indicators).

- Block 2. Data preprocessing – include data cleaning, handling missing values, feature engineering, variable transformation, normalization and scaling, construction of the dataset.
- Block 3. Application of machine learning methods – include usage of such methods like random forest, gradient boosting (XGBoost / LightGBM), support vector machines, neural networks.
- Block 4. Model evaluation – include such data like classification metrics, ROC-AUC, precision/recall, accuracy, regression metrics, $R^2$, RMSE, MAE, cross-validation.
- Block 5. Model interpretation – include results of feature importance, SHAP analysis, identification of key determinants of debt sustainability.
- Block 6. Output results – include estimation of the DSI, forecasting the debt sustainability level, early warning signals of financial distress risk.

Such a multi-level approach ensures the robustness of the obtained results and enables the integration of both predictive and explanatory functions of the model.

**Conclusion.** The proposed conceptual model for predicting corporate debt sustainability is systemic and integrated, combining internal and external factors that influence a company's debt sustainability. The model will serve as a theoretical basis for empirical validation and further development of predictive systems based on modern machine learning methods.

## References


1. Amoa-Gyarteng, K.: Corporate Financial Distress: The Impact of Profitability, Liquidity, Asset Productivity, Activity and Solvency. *Journal of Accounting, Business and Management (JABM)*, № 2, p. 104, (2021).
2. Balasubramanian, S. A., Radhakrishna, G.S., Sridevi, P., Natarajan, T.: Modeling corporate financial distress using financial and non-financial variables. *International Journal of Law and Management*, № 3/4, pp. 457-484, (2019).
3. Barboza, F., Kimura, H., Altman, E.: Machine learning models and bankruptcy prediction. *Expert Systems with Applications*, 83(3), pp. 405-417, (2017). https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.006
4. Bussmann, N., Giudici, P., Marinelli, D., et al.: Explainable Machine Learning in Credit Risk Management. *Comput Econ*, 57, pp. 203-216, (2021). https://doi.org/10.1007/s10614-020-10042-0.
5. Chen, L. (2018). *Corporate Debt and Macroeconomic Shocks*. Economic Modelling
6. Damodaran, A.: *Applied Corporate Finance*. John Wiley and Sons Ltd, 656 p., (2015).
7. Fischer, T., Krauss, C.: Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. *European Journal of Operational Research*, 270(2), pp. 654-669, (2018).
8. Gompers, P., Ishii, J., Metrick, A.: Corporate Governance and Equity Prices. *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 118, No. 1, pp. 107-155, (2003). https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.278920.
9. Goodluck, H. C., Iliemena, R. O., Islam, M. M.: Financial crises as a threat to corporate sustainability: evaluating the implications of asset devaluation and debt deflation in the pursuit of sustainable development. *International Journal of Accounting & Finance Review*, 13(1), pp. 35-41, (2022).
10. Gu, S., Kelly, B., Xiu, D.: Empirical asset pricing via machine learning. *Review of Financial Studies*, 33(5), pp. 2223-2273, (2020). https://doi.org/10.1093/rfs/hhaa009.
11. Jones, S., Johnstone, D., Wilson, R.: Predicting corporate bankruptcy: an evaluation of alternative statistical frameworks. *Journal of Business Finance & Accounting*, 44(1-2), pp. 3-34, (2017).
12. Kou, G., Peng, Y., Wang, G.: Evaluation of clustering algorithms for financial risk analysis using MCDM methods. *Information Sciences*, 275, pp. 1-12, (2014).
13. Lessmann, S., Baesens, B., Seow, H., Thomas, L.: Benchmarking state-of-the-art classification algorithms for credit scoring. *European Journal of Operational Research*, 247(1), pp. 124-136, (2015). https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.030.
14. Liu, Y., Wang, H., Zheng, M.: Construction of a corporate financial distress prediction model based on F-DNNs. *Intelligent Decision Technologies*, № 4, pp. 2368-2380, (2025).
15. Primawan, A.: Systematic Literature Review – Determinants of Corporate Financial Distress Prediction. *Jurnal Akuntansi*, № 2, pp. 120-130, (2023).
16. Shi, Y., Li, X.: *An Overview of Bankruptcy Prediction Using Machine Learning*, (2019).
17. Veres, O., Ilchuk, P., Kots, O.: Application of machine learning methods for forecasting real estate value. *CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3664: Proceedings of the 8th International conference on computational linguistics and intelligent systems. Vol. I: Machine learning workshop*, pp. 70-93, (2024).

# COMPETENCY-AWARE TASK ASSIGNMENT IN SOFTWARE TEAMS: A MULTI-CRITERIA DECISION MODEL WITH JIRA INTEGRATION

**Vorobyov V., Nikolaienko A., Pylypenko A.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

**Abstract**. Effective task assignment among developers is a critical success factor in IT projects; however, existing project management tools reduce this problem to quantitative workload balancing. The aim of this study is to develop the Equilibria software system for multi-criteria task assignment within a development team, integrated with the Jira platform. The proposed solution is grounded in the WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) method, which accounts for competency levels, technical domain specifics, current workload, and cognitive focus indicators of team members. Model verification was conducted through controlled simulation modelling. The effectiveness of the Equilibria system algorithm was evaluated against two baseline strategies: the built-in Jira Native (Balanced Workload) mechanism and a heuristic corporate script based on a greedy algorithm (Greedy Skill-Based). Experimental results demonstrated that the developed multi-criteria evaluation model reduces the number of cross-domain context switches by 12-14% and decreases the number of critical developer overloads by 7-27% compared to alternative solutions. It was established that the permissible increase in load variance constitutes a justified trade-off that ensures operational team resilience and provides preventive protection of specialists against excessive workload under dynamic backlog conditions.

**Keywords**: competency-based assignment, software development teams, multi-criteria decision making, WASPAS, Jira, agile project management, Clean Architecture.

**Introduction**. Effective task distribution in cross-functional IT teams is a critical prerequisite for project success; nevertheless, the native tooling of leading project management platforms – Jira, Monday.com, Asana, and ClickUp – reduces this problem primarily to quantitative workload balancing, disregarding the objective complexity of tasks and the domain expertise of assignees. At the same time, the AI modules integrated into these platforms are focused mainly on routine automation and delegation of operations to virtual agents, rather than on multi-criteria optimisation of work distribution among human specialists [1].

Specialised solutions extend the assignment context but remain within the bounds of heuristic or deterministic approaches. In particular, custom scripting tools (ScriptRunner for Jira) rely on greedy algorithms with rigid threshold filtering; plugins (Smart Assignment for Jira) operate on static rule sets; and engineering analytics platforms (LinearB, Waydev, Jellyfish) address exclusively descriptive tasks of retrospective performance analysis.

An alternative lies in the application of the mathematical apparatus of Multi-Criteria Decision Making (MCDM), specifically the Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) method and universal SaaS ranking systems (1000minds). However, these approaches lack direct integration with project management platforms and require manual data entry, which constitutes a systemic research-practice gap. Addressing this gap necessitates the development of a model embedded within the project management platform environment, capable of aggregating heterogeneous candidate-selection criteria into a single mathematically grounded ranking procedure.

**The purpose of the work** is to develop a software system for multi-criteria task assignment, integrated with the Jira platform, that accounts for the competency profile, current workload, and cognitive focus indicators of team members.

**Materials and Methods**. The problem of automated task distribution is addressed by means of the hybrid multi-criteria evaluation method Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) [2]. The integral relevance score $Q_i$ of the $i$-th developer for a given task is defined by the following formula:

$$Q_i = \lambda \sum_{j=1}^{n} x_{ij} w_j + (1-\lambda) \prod_{j=1}^{n} (x_{ij})^{w_j}, \quad (1)$$

where $\lambda$ is the balance coefficient ($0 \leq \lambda \leq 1$), which determines the relative contribution of each constituent strategy to the final decision; $x_{ij}$ is the normalised score of the $i$-th developer on the $j$-th criterion; $w_j$ is the weight of the $j$-th criterion; and $n$ is the total number of evaluation criteria.

Each alternative (developer candidate) is assessed against a vector of three criteria:

1) Cognitive focus retention coefficient ($K_{focus}$) evaluates productivity losses arising from a change in working context. When the domain is preserved, the criterion equals 1.0; a cross-domain assignment receives a fixed metric penalty of 0.8 [3].

2) Resource freshness coefficient ($K_{fresh}$) mathematically expresses the remaining cognitive reserve of a specialist:

$$K_{fresh} = 1 - \left(W/V_{max}\right)^{\gamma}, \quad (2)$$

where $W$ is the developer's current workload (in Story Points); $V_{max}$ is the maximum throughput per iteration (in Story Points); and $\gamma$ is the degradation exponent.

The power-law relationship ensures a sharp decline in the candidate's ranking score as the specialist approaches their throughput ceiling, thereby acting as a preventive mechanism against burnout.

3) Skill match coefficient ($K_{skill}$) handles the qualification gap ($\Delta L$) in a differentiated manner. Insufficient qualification acts as an absolute veto ($K_{skill} = 0$), eliminating the candidate entirely. Over-qualification is penalised by a decreasing exponential function ($K_{skill} = e^{-\beta \Delta L}$) to reduce the risk of demotivating highly skilled specialists.

For the objective determination of criterion weights ($w_j$), Shannon's entropy method is integrated [4]. It derives the significance of indicators based on their statistical dispersion within the decision matrix, thereby eliminating subjectivity. At the same time, the system architecture provides for the possibility of expert weight adjustment by the project manager.

Model verification was conducted through simulation modelling to compare three algorithms: the built-in Jira Native (Balanced Workload), the conventional Industry Script (Greedy Skill-Based), and the proposed Equilibria system algorithm (WASPAS-based). To ensure statistical significance, the experiment was carried out on 10 independent synthetic datasets, each comprising 40 developers and 400 tasks. Generation parameters were calibrated to reflect a typical IT team. A standard grade distribution was maintained (20% Junior, 50% Middle, 30% Senior), with differentiated sprint throughput limits ranging from 15 to 50 Story Points across five technical domains (Frontend, Backend, QA, DevOps, and Database). Tasks were estimated on the Fibonacci scale $\{1, 2, 3, 5, 8\}$. The initial workload was randomly distributed within 0–80% of each specialist's individual maximum.

Algorithm performance was evaluated using four metrics:

1) Context Switches – the number of cross-domain assignments that incur additional cognitive load and time costs associated with context adaptation.

2) Over-skilling – the number of assignments in which a higher-grade developer is assigned to a task of lower complexity. This reflects the inefficient utilisation of highly qualified human resources.

3) Capacity Breaches – the number of instances in which a developer's maximum sprint workload limit is exceeded. This serves as an indicator of professional burnout risk.

4) Load Variance (σ) – the standard deviation of final workload percentages across all developers upon completion of the full backlog processing.

**System architecture**. The Equilibria software system is built on Clean Architecture principles, ensuring isolation of the mathematical module from infrastructure dependencies. Structurally, the solution comprises four layers: the client layer (a React SPA for administration and weight configuration), the web API layer (ASP.NET Core 10), the business logic core (a computational module implementing the multi-criteria evaluation model), and the infrastructure layer (PostgreSQL DBMS and platform integration mechanisms).

Bidirectional integration with Jira Cloud operates in real time. Upon task creation or update, Jira dispatches a webhook to the system. Following cryptographic verification of the JWT signature, the system retrieves developer profiles and performs a multi-criteria evaluation. The task is automatically assigned to the highest-ranked candidate via an HTTP PUT request to the Jira REST API, and the outcome is recorded in the database within a single transaction. Should no developer satisfy the evaluation criteria, the system blocks random assignment and posts a comment in Jira requiring expert manual distribution.

**Results**. Quantitative evaluation revealed substantial differences in the algorithmic strategies (Table 1). The highest grade utilisation efficiency was demonstrated by Industry Script, while Jira Native achieved the most mathematically stable work distribution (lowest σ). The Equilibria system exhibited a higher rate of over-qualification assignments while demonstrating consistent superiority in cognitive focus preservation, reducing the number of cross-domain assignments by 12-14% relative to the compared alternatives.

Table 1

**Comparative analysis of task assignment algorithms**

| Algorithm | Context Switches | Over-skilling | Load Variance (σ) | Capacity Breaches |
|---|---|---|---|---|
| Jira Native | 299 ± 9 | 224 ± 18 | **0.073 ± 0.014** | 176 ± 20 |
| Industry Script | 293 ± 12 | **46 ± 22** | 0.425 ± 0.077 | 208 ± 10 |
| Equilibria | **256 ± 11** | 142 ± 32 | 0.598 ± 0.078 | **164 ± 20** |

Analysis of workload metrics confirmed an inverse relationship between distribution uniformity and adherence to throughput limits. Despite exhibiting the highest overall load variance, Equilibria successfully minimised the number of critical developer overloads (Capacity Breaches), allowing 7-27% fewer limit violations than the alternative solutions.

**Discussion**. The results obtained are explained by architectural differences in the objective functions of the respective algorithms. The advantage in focus preservation at the cost of increased Over-skilling reflects a deliberate trade-off: unlike Industry Script's rigid grade-based filtering, Equilibria applies a soft exponential penalty to retain specialists within their working domain.

Analysis of workload metrics reveals a paradox between formal uniformity and the risk of professional burnout. Jira Native distributes work by task count alone, creating an illusion of balance while producing hidden overloads. Industry Script exhibits the worst overload indicators, as its skill-prioritisation strategy consistently concentrates tasks on Senior developers. The Equilibria system avoids these shortcomings by filtering out candidates approaching their throughput ceiling ($V_{max}$) based on actual Story Point estimates. The system deliberately accepts higher load distribution variance in order to protect developers from chronic exhaustion.

**Conclusions**. The proposed multi-criteria evaluation model enables the formalisation of developer competencies, domain characteristics, and objective task complexity into a single composite indicator. Through the transition to preventive workload management, the Equilibria system algorithm reduced the number of cross-domain context switches by 12-14% and minimised critical overloads by 7-27% compared to the baseline strategies. The deliberate acceptance of higher load variance and Over-skilling levels is demonstrated to be a justified architectural trade-off that supports a sustainable teamwork pace and protects specialists from burnout.

## References


1. Al-Fraihat, D., Sharrab, Y., Al-Ghuwairi, A. R., Alzabut, H., Beshara, M., & Algarni, A. (2024). Utilizing machine learning algorithms for task allocation in distributed agile software development. Heliyon, 10(21), e39926. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39926
2. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., & Zakarevicius, A. (2012). Optimization of weighted aggregated sum product assessment. https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810
3. Abad, Z. S. H., Noaeen, M., Zowghi, D., Far, B. H., & Barker, K. (2018, June). Two Sides of the Same Coin: Software developers' perceptions of task switching and task interruption. https://doi.org/10.1145/3210459.3214170
4. Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. Encyclopedia, 3(1), 77-87. https://doi.org/10.3390/encyclopedia301000

# ІНТЕГРОВАНА РИЗИКО-СТІЙКА АДАПТИВНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНЬОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Bieliatynskyi A.[1], Бакуліч О.О.[2], Самойленко Є.С.[2], Голоденко В.О.[2], Песковець Ю.М.[2]**
[1]North Minzu University, Yinchuan, P.R. China
[2]Національний транспортний університет, Київ, Україна

**Анотація.** Інтелектуальні інформаційні технології є важливими елементами діяльності та розвитку підприємств, оскільки дозволяють ефективно управляти ресурсами, аналізувати та прогнозувати ключові показники організацій, а також приймати стратегічні рішення. У роботі проаналізовано сучасний стан впровадження інформаційних систем і технологій вітчизняними підприємствами. Розглянуто основні методи та інструменти інтелектуального аналізу даних та їх вплив у процесі прийняття управлінських рішень. Запропоновано інтегровану ризико-стійку адаптивну модель управління постачанням (IRRSM), яка базується на поєднанні процесного, функціонального, ризикового та інтелектуального підходів. Модель формалізовано у вигляді багатокритеріальної оптимізаційної задачі, що враховує сукупні витрати, рівень ризику, показники стійкості та адаптивності системи. Результати дослідження дозволять досягнути підвищення ефективності діяльності підприємств, зокрема, транспортно-дорожнього комплексу завдяки оптимізації виробничих процесів та управління ресурсами, підвищенні безпеки перевезень, зниженні витрат.

**Ключові слова**: інтелектуальні інформаційні технології, транспортно-дорожній комплекс, управління підприємством, ризико-стійке управління, адаптивна логістична модель, ланцюги постачання, ефективність управлінських рішень, ризики постачання.

# INTEGRATED RISK-RESILIENT ADAPTIVE MODEL FOR SUPPLY MANAGEMENT OF TRANSPORT AND ROAD COMPLEX ENTERPRISES BASED ON INTELLIGENT TECHNOLOGIES

**Bieliatynskyi A.[1], Bakulich O.[2], Samoilenko Y.[2], Holodenko V.[2], Peskovets Y. [2]**
[1]North Minzu University, Yinchuan, P.R. China
[2]National Transport University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** Intelligent information technologies are fundamental drivers of enterprise operations and strategic development, facilitating efficient resource management, predictive analytics of key performance indicators, and informed strategic decision-making. This paper analyzes the current state of information systems and technology implementation within domestic enterprises. The study examines core data mining methods and tools, evaluating their specific impact on the managerial decision-making process. The author proposes an Integrated Risk-Resilient Adaptive Supply Management (IRRSM) model, built upon a synthesis of process-oriented, functional, risk-based, and intelligent approaches. The model is formalized as a multi-objective optimization problem that accounts for total costs, risk exposure, and the metrics of systemic resilience and adaptability. The research findings provide a framework for enhancing the operational efficiency of transport and road complex enterprises by optimizing production workflows, refining resource management, increasing transportation safety, and reducing overall costs.

**Keywords**: intelligent information technologies, transport and road complex, enterprise management, risk-resilient management, adaptive logistics model, supply chains, managerial decision efficiency, supply risks.

**Вступ.** На сьогоднішній день у зв’язку зі стрімкою цифровізацією більшості напрямків суспільно-економічної діяльності, ефективна діяльність та розвиток підприємств виявляється неможливою без застосування сучасних інформаційних систем і технологій. Упродовж останніх років інтелектуальні інформаційні технології набувають дедалі більшого рівня інтеграції у діяльність організацій та бізнес-структур, сприяючи створенню інноваційних товарів і послуг, формуванню стратегій розвитку, впровадженню комплексних систем автоматизованого проєктування та планування виробничих процесів, а також програмного забезпечення щодо фінансового, податкового й управлінського обліку, що забезпечує зміцнення ринкових позицій підприємств [1,2]. У нинішніх умовах глобалізації ринку та зростаючого обсягу вантажних перевезень, транспортні підприємства постають

перед необхідністю в оптимізації виробничих процесів, підвищенні ефективності управління ресурсами, зміцненні конкурентних переваг. Досягнення зазначених цілей значною мірою забезпечується завдяки впровадженню інтелектуальних інформаційних технологій, які дають змогу здійснювати збір, обробку, аналіз великих масивів даних у режимі реального часу та допомагають приймати ефективні управлінські рішення [3].

**Мета роботи**. Дослідити напрямки застосування інтелектуальних інформаційних технологій для підвищення ефективності діяльності підприємств транспортно-дорожнього комплексу. Запропонувати інтегровану ризико-стійку адаптивну модель управління постачанням на основі інтелектуальних технологій (RRASM).

**Постановка проблеми**. Сучасні наукові дослідження свідчать про значний вплив інтелектуальних інформаційних технологій та методів інтелектуального аналізу в підвищенні результативності та ефективності управління транспортними підприємствами. Для вантажно-логістичних компаній впровадження відповідних технологій набуває характеру стратегічної необхідності, оскільки своєчасність і безпека транспортування вантажів безпосередньо визначають їхні конкурентні позиції на ринку та рівень довіри з боку клієнтів. Використання технологій аналітики великих даних (Big Data), IoT (Internet of Things), штучного інтелекту та нейронних мереж дозволяє компаніям відслідковувати транспортні засоби у реальному часі, контролювати стан вантажу, аналізувати маршрути, прогнозувати завантаженість доріг, терміни доставки, витрати пального, визначати оптимальний рівень складських запасів тощо.

**Основна частина**. Інтелектуальні інформаційні технології (ІІТ) у сучасних умовах виступають ключовим інструментом підвищення ефективності функціонування підприємств транспортно-дорожнього комплексу (ТДК), забезпечуючи інтеграцію процесів збору, обробки, аналізу та інтерпретації даних у єдину інформаційно-аналітичну систему. На відміну від традиційних інформаційних систем, ІІТ базуються на використанні методів штучного інтелекту, машинного навчання та обробки великих даних, що дозволяє реалізувати адаптивне управління складними транспортно-логістичними системами [1;4;10]. Концептуально інтелектуальні інформаційні технології у діяльності підприємств ТДК доцільно розглядати як багаторівневу систему, що включає: рівень збору даних (сенсорні системи, IoT-пристрої, GPS-моніторинг); рівень зберігання та обробки даних (хмарні платформи, Big Data-архітектури); аналітичний рівень (алгоритми Data Mining, машинного навчання); рівень підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems, DSS). [10; 11]

Упродовж останніх років відбувається активне впровадження інформаційних технологій у всіх сферах світової економіки. На рисунку 1 відображено динаміку використання інформаційних технологій, а саме ERP-систем, технологій аналізу “Big Data”, елементів штучного інтелекту українськими підприємствами за останні роки.

Так, за даними Державної служби статистики України станом на 2025 рік майже в три рази зросла частка підприємств, що використовує програмне забезпечення (ERP), що забезпечує можливість централізованого управління та підвищення прозорості проведення операцій [5]. Згідно статистичних даних частка підприємств що використовувала технології “Big Data” за останні роки збільшилася вдвічі, а частка підприємств, які використовують елементи штучного інтелекту майже не змінювалась і становила близько 5%.

Застосування інтелектуальних технологій відіграє значну роль в діяльності транспортних підприємств, зокрема, дозволяють:

- аналізувати великий обсяг інформації та визначати оптимальні стратегії на основі прогнозів і можливих ризиків;
- оптимізувати маршрути шляхом аналізу даних про параметри транспортного потоку, дорожні та погодні умови, з метою скорочення часу доставки, вартості перевезення;
- ефективно управляти ланцюгами постачань, оптимізуючи процеси управління запасами, прогнозування попиту;
- планувати виробничі процеси шляхом визначення оптимальних графіків роботи водіїв, використання транспорту;
- здійснювати управління персоналом: проводити аналіз продуктивності працівників та прогнозують плинність кадрів;

– проводити аналіз ринку транспортних послуг, вивчати конкурентів, оцінювати можливий попит та виявляти нові можливості для розвитку;
– прогнозувати потреби клієнтів, проводити аналіз їх задоволеності, а також пропонувати персоналізовані рекомендації.

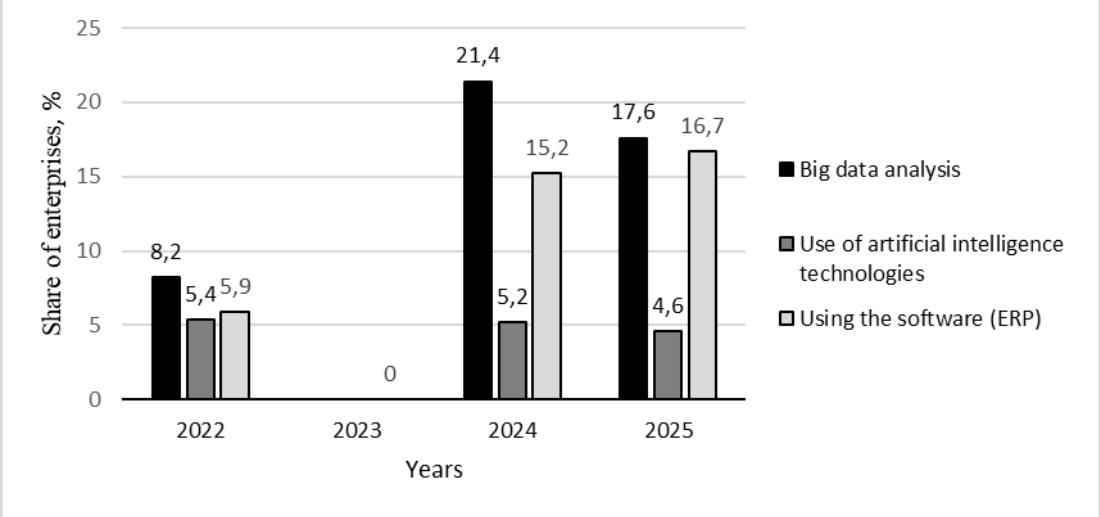



Рис. 1. Використання інформаційних технологій підприємствами України

Використання технологій Big Data дозволяє здійснювати обробку значних обсягів структурованої та неструктурованої інформації, що формується в процесі функціонування транспортних систем. [10] Це забезпечує підвищення точності прогнозування попиту на транспортні послуги, оптимізацію маршрутів перевезень, а також зниження операційних витрат за рахунок ефективнішого використання ресурсів. Формально задачу оптимізації маршрутів можна представити як задачу мінімізації функції витрат:

$$F = f(T, C, R, E) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де: $T$ – час доставки; $C$ – транспортні витрати; $R$ – рівень ризику; $E$ – екологічні витрати.

Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє адаптивно змінювати параметри цієї функції залежно від динаміки зовнішнього середовища. Важливим напрямом є використання технології Internet of Things (IoT), яка забезпечує безперервний моніторинг технічного стану транспортних засобів, параметрів руху, умов перевезення вантажів. [11] На основі отриманих даних реалізується концепція predictive maintenance (прогнозного технічного обслуговування), що базується на моделі:

$$P(failure) = f(x_1, x_2, \ldots, x_n), \quad (2)$$

де $x_i$ – параметри технічного стану транспортного засобу.

Це дозволяє знизити ймовірність аварійних ситуацій, скоротити витрати на ремонт та підвищити рівень безпеки перевезень. Застосування штучного інтелекту (AI) у системах управління підприємствами ТДК забезпечує автоматизацію прийняття управлінських рішень, прогнозування попиту та навантаження на транспортну інфраструктуру, оптимізацію логістичних процесів у режимі реального часу, управління ризиками на основі сценарного аналізу.

У сучасних умовах високої невизначеності (воєнні ризики, розриви ланцюгів постачання, коливання цін, кіберзагрози) класичні моделі управління постачанням (EOQ, JIT) демонструють обмежену ефективність через їх статичність і орієнтацію виключно на мінімізацію витрат. [6;7] Їх ключовий недолік полягає у відсутності інтегрованого врахування ризиків та адаптивності системи. Сучасна парадигма трансформується у напрямі risk-resilient supply management, де постачання розглядається як динамічна система, багатокритеріальна задача та адаптивний процес, що функціонує в умовах неповної інформації. Ключовою проблемою залишається відсутність інтегрованої моделі, яка б одночасно враховувала витрати, ризики, стійкість (resilience) та рівень цифровізації. [8]

Запропонована інтегрована ризико-стійка адаптивна модель управління постачанням на основі інтелектуальних технологій (Risk-Resilient Adaptive Supply Model (RRASM)) базується на інтеграції п’яти контурів:

– операційний контур – управління потоками (закупівля, транспортування, запаси);
– ризиковий контур – ідентифікація та оцінка ризиків;

– інтелектуальний контур – AI/Big Data-аналітика;
– контур стійкості (resilience) – адаптаційні механізми;
– контур безперервності (BCP) – відновлення системи.

Формалізовано основна цільова функція моделі описується як задача багатокритеріальної оптимізації:

$$\min Z = \alpha C + \beta R - \gamma S - \delta A, \quad (3)$$

де: $C$ – сукупні витрати постачання; $R$ – інтегральний рівень ризику; $S$ – показник стійкості системи; $A$ – рівень адаптивності; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти.

Таким чином, запропонована модель інтегрує економічні, ризикові та технологічні параметри; дозволяє переходити від реактивного до проактивного управління; забезпечує адаптивну оптимізацію в реальному часі; формує основу для інтелектуальних систем підтримки рішень (DSS) [12; 13].

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження обґрунтовано, що в умовах зростаючої невизначеності зовнішнього середовища, зумовленої геополітичними, економічними, технологічними та екологічними факторами, забезпечення ефективності діяльності підприємств транспортно-дорожнього комплексу потребує переходу від традиційних підходів управління до інтелектуалізованих, адаптивних і ризико-орієнтованих моделей. Запропоновано інтегровану ризико-стійку адаптивну модель управління постачанням (IRRSM), яка базується на поєднанні процесного, функціонального, ризикового та інтелектуального підходів. Модель формалізовано у вигляді багатокритеріальної оптимізаційної задачі, що враховує сукупні витрати, рівень ризику, показники стійкості та адаптивності системи. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель інтегрує механізми прогнозування збоїв, сценарного аналізу та автоматизованого коригування управлінських рішень у реальному часі. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі як основи для розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття управлінських рішень на підприємствах транспортно-дорожнього комплексу. Її застосування дозволяє підвищити рівень стійкості ланцюгів постачання, мінімізувати вплив ризиків та забезпечити безперервність бізнес-процесів в умовах кризових ситуацій.

## Список використаних джерел


1. Сучасні інформаційні технології і системи: монографія / за заг. ред . В. С. Пономаренка. Х. : Видавництво «Стиль-іздат», 2021. 182 с .
2. Tarasova K. I. The Evolution of Information Systems in the Economy. Бізнес Інформ. 2020. №4. С. 289–295. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-4-289-295
3. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Україні : монографія / за заг. ред. А. І. Шевченка. Київ: ІПШІ, 2023. 305 с.
4. Оксамитна Л. П., Пряха Р. І. Особливості сучасних ERP-систем управління бізнес-процесами підприємства. Управління розвитком складних систем. 2022. Вип. 51. С. 31-40. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.51.31-40.
5. Сеник А., Пиріг Ю., Шпур О. Дослідження інтелектуального алгоритму моніторингу якості роботи систем масового обслуговування. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. 2024. Вип. 4, № 2, С. 103–112. https://doi.org/10.23939/ictee2024.02.103
6. Крикавський Є. В. Логістика та управління ланцюгами поставок : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 360 с.
7. Christopher M. Logistics & Supply Chain Management. 6th ed. London : Pearson, 2022. 352 p.
8. Sheffi Y. The New (Ab) Normal: Reshaping Business and Supply Chain Strategy Beyond Covid-19. Cambridge: MIT Press, 2020. 280 p.
9. European Commission. Sustainable and Smart Mobility Strategy. Brussels, 2020. URL: https://ec.europa.eu
10. Wamba S. F., Akter S., Edwards A., Chopin G., Gnanzou D. How ‘big data’ can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. International Journal of Production Economics. 2020. Vol. 165. P. 234–246.
11. Min H. Artificial Intelligence in Supply Chain Management: Theory and Applications. International Journal of Logistics Research and Applications. 2021. Vol. 24, No. 1. P. 1–25.
12. ISO 50001:2018 Energy management systems – Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2018 (чинний у 2020–2025 рр.).
13. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Geneva: ISO, 2018 (чинний у 2020–2025 рр.).

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ В ІНЖИНІРИНГОВИХ КОМПАНІЯХ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

**Bieliatynskyi A.[1], Данченко О.Б.[2], Ткаченко Ф.В.[2], Бакуліч О.О.[3]**
North Minzu University, Yinchuan, NingXia, P.R. China[1],
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна[2]
Національний транспортний університет, Київ, Україна[3]

**Анотація**. У роботі розглянуто проблему оцінювання ризиків бізнес-процесів інжинірингових компаній в умовах невизначеності та неповноти інформації. Запропоновано математичну модель оцінювання ризиків на основі поєднання методів нечіткої логіки та нейронних мереж. Модель базується на системі нечіткого логічного виводу Мамдані, де вхідними змінними є імовірність виникнення ризику та ступінь його впливу на результати бізнес-процесів, а вихідною змінною — інтегральний рівень ризику. Для опису лінгвістичних змінних використано Гаусові функції належності, що забезпечують гладкість моделі та можливість застосування методів градієнтного навчання. Для автоматичного налаштування параметрів функцій належності та вагових коефіцієнтів правил запропоновано використання нейро-нечіткої моделі з алгоритмом зворотного поширення помилки. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність оцінювання ризиків та може бути використаний у системах підтримки прийняття управлінських рішень в інжинірингових компаніях.

**Ключові слова**: бізнес-процеси, управління ризиками,, інжинірингові компанії, нечітка логіка, нейро-нечітка модель.

# MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING BUSINESS PROCESS RISKS IN ENGINEERING COMPANIES BASED ON FUZZY LOGIC THEORY

**Bieliatynskyi A.[1], Tkachenko F.[2], Danchenko O.[2], Bakulich O.[3]**
North Minzu University, Yinchuan, NingXia, P.R. China[1],
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine[2]
National Transport University, Kyiv, Ukraine[3]

**Abstract**. The paper addresses the problem of assessing risks in the business processes of engineering companies under conditions of uncertainty and incomplete information. A mathematical model for risk assessment based on a combination of fuzzy logic methods and neural networks is proposed. The model is based on the Mamdani fuzzy inference system, where the input variables are the probability of risk occurrence and the degree of its impact on business process performance, while the output variable is the integrated risk level. Gaussian membership functions are used to describe linguistic variables, ensuring model smoothness and enabling the application of gradient-based learning methods. To automatically adjust the parameters of membership functions and rule weights, a neuro-fuzzy model with a backpropagation learning algorithm is proposed. The proposed approach improves the accuracy of risk assessment and can be applied in decision support systems for managing risks in engineering companies.

**Keywords**: business processes, risk management, engineering companies, fuzzy logic, neuro-fuzzy model.

**Вступ**. Інжинірингові підприємства працюють у середовищі високої невизначеності, де на результати діяльності впливають технічні, організаційні, фінансові та управлінські фактори. У таких умовах традиційні методи оцінювання ризиків, які ґрунтуються на статистичних або експертних підходах, не завжди дозволяють отримати достатньо точні результати. Особливістю оцінювання ризиків бізнес-процесів в інжинірингових компаніях є наявність нечітких, неповних або суб'єктивних даних [1,2]. Тому для моделювання таких процесів доцільно використовувати методи нечіткої логіки, які дозволяють формалізувати експертні знання та працювати з лінгвістичними змінними. Водночас для підвищення точності моделей та автоматизації налаштування їх параметрів доцільно застосовувати методи машинного навчання, зокрема нейронні мережі.

Поєднання нечіткої логіки та нейронних мереж дозволяє створювати нейро-нечіткі системи, які забезпечують адаптивність математичної моделі та підвищують точність оцінювання рівня ризику бізнес-процесів.

**Мета роботи**. Метою роботи є розробка математичної моделі оцінювання ризиків бізнес-процесів інжинірингових компаній на основі поєднання методів нечіткої логіки та штучних нейронних мереж, що дозволяє автоматизувати процес визначення параметрів функцій належності та підвищити точність оцінювання рівня ризику.

**Постановка задачі**. Однією з ключових проблем управління ризиками бізнес-процесів інжинірингових компаній є складність формалізації взаємозв'язків між параметрами ризику, такими як імовірність виникнення події та її вплив на результати діяльності підприємства. При цьому значна частина інформації про ризики має експертний або якісний характер, що ускладнює використання класичних математичних моделей.

Для підвищення точності оцінювання ризиків необхідно розробити математичну модель, яка б дозволяла враховувати нечіткість вхідних даних, а також забезпечувала можливість автоматичного налаштування параметрів функцій належності та вагових коефіцієнтів правил. Така модель повинна поєднувати можливості нечіткого логічного виводу та адаптивного навчання.

У зв'язку з цим виникає задача розробки нейро-нечіткої моделі оцінювання ризиків бізнес-процесів інжинірингових компаній, яка базується на алгоритмі нечіткого виводу Мамдані та використовує механізм навчання за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки.

**Основна частина**. У роботі запропоновано математичну модель оцінювання ризиків бізнес-процесів інжинірингових компаній, яка базується на використанні методів нечіткої логіки та нейро-нечітких систем. Основною ідеєю моделі є формалізація процесу оцінювання ризику на основі нечітких лінгвістичних змінних та подальша оптимізація параметрів моделі за допомогою методів машинного навчання.

У межах моделі ризик бізнес-процесів розглядається як функція двох основних параметрів: імовірності виникнення ризикової події та ступеня її впливу на результати функціонування бізнес-процесів підприємства. З метою врахування невизначеності та нечіткості експертних оцінок ці параметри представлені у вигляді лінгвістичних змінних, що описуються відповідними нечіткими множинами.

На першому етапі реалізації моделі здійснюється фазифікація вхідних параметрів. Для опису лінгвістичних змінних використано гаусові функції належності, які забезпечують неперервність та диференційовність моделі. Використання таких функцій дозволяє підвищити стабільність моделювання та створює передумови для використання градієнтних методів оптимізації параметрів системи.

Наступним етапом є формування бази нечітких правил типу «ЯКЩО–ТО», яка визначає залежність між вхідними параметрами ризику та рівнем ризику бізнес-процесів [3]. Кожне правило описує певну комбінацію значень імовірності ризику та рівня його впливу на результати діяльності підприємства. Агрегація умов правил здійснюється за допомогою операції алгебраїчного добутку, що дозволяє отримати ступінь активації кожного правила нечіткої бази знань.

На наступному етапі реалізується процедура нечіткого логічного виводу відповідно до алгоритму Мамдані. Результати активації правил агрегуються та використовуються для формування узагальненої нечіткої оцінки рівня ризику. Для отримання чіткого значення вихідної змінної використовується метод центра ваги, який забезпечує інтеграцію результатів усіх активованих правил та формування інтегральної оцінки ризику [4, 5]. Для дискретної реалізації в комп'ютерних алгоритмах формула набуває вигляду:

$$y^* \approx \frac{\sum_{i=1}^{N} z_i \cdot \mu_{agg}(z_i)}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{agg}(z_i)},$$

де: $z_i$ - дискретні значення ризику; $N$ - кількість дискретних точок; $y^*$ - дефазифікована оцінка ризику; $\mu_{agg}(z)$ - сумарна нечітка оцінка.

З метою підвищення точності моделі та автоматизації процесу налаштування її параметрів у роботі використано нейро-нечітку архітектуру. Вона представлена у вигляді багатошарової нейронної мережі прямого поширення сигналу, яка реалізує механізм нечіткого логічного виводу. У процесі навчання мережі відбувається коригування параметрів функцій належності, а також вагових коефіцієнтів нечітких правил.

Оптимізація параметрів моделі здійснюється за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки. Для цього визначається функція помилки, що характеризує відхилення між фактичним та прогнозованим значенням рівня ризику. На основі обчислення часткових похідних цієї функції за параметрами моделі виконується їх поступове коригування, що забезпечує мінімізацію похибки оцінювання.

Запропонована математична модель дозволяє поєднати можливості нечіткої логіки щодо формалізації експертних знань із адаптивністю нейронних мереж. Це забезпечує більш точне оцінювання ризиків бізнес-процесів та підвищує ефективність підтримки прийняття управлінських рішень в інжинірингових компаніях.

**Висновок**. У роботі розроблено математичну модель оцінювання ризиків бізнес-процесів інжинірингових компаній, яка базується на використанні нечіткої логіки та нейро-нечітких методів. Запропонована модель дозволяє враховувати нечіткість та невизначеність вхідної інформації, формалізувати експертні знання та забезпечити кількісне оцінювання рівня ризику.

Використання нейро-нечіткої моделі забезпечує автоматичне налаштування параметрів функцій належності та вагових коефіцієнтів правил, що підвищує точність і адаптивність системи. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності управління ризиками та підтримки прийняття управлінських рішень у процесі оптимізації бізнес-процесів інжинірингових підприємств.

## Список використаних джерел


1. Ткаченко, Ф. (2025). Концептуальна модель протиризикового управління бізнес-процесами в інжинірингових компаніях «7S+R». *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження,* (29), 242–248. https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.242-248
2. Shiri, S., Anvari, A., & Soltani, H. (2014). An assessment of readiness factors for implementing erp based on agility (extension of mckinsey 7s model). *International Journal of Management, Accounting and Economics*, 1(3), 229-246. URL: https://www.academia.edu/download/82277767/download.pdf
3. Ahmad Shukri, F. A., Isa, Z. (2021). Experts' Judgment-Based Mamdani-Type Decision System for Risk Assessment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), DOI:10.1155/2021/6652419
4. Izquierdo, S., Izquierdo, L. R. (2017). Mamdani fuzzy systems for modelling and simulation: A critical assessment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 21(3) 2, 2018. URL: https://www.jasss.org/21/3/2.html
5. Pokorádi, L., (2002). Fuzzy logic-based risk assessment. *Academic and Applied Research in Military* Science, 1(1), pp.63–73. URL: https://www.researchgate.net/publication/267548987_Fuzzy_logic-based_risk_assessment.

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КВАНТИФІКАЦІЇ ФІЗИЧНОГО ОБСЯГУ ІТ-ПРОЄКТІВ БАНКІВСЬКИХ УСТАНОВ

**Солдо Б.[1], Гайдаєнко О.В.[2] , Серік О. А.[2], Моргулець О.Б.[3]**
[1]University North, Koprivnica, Croatia
[2]Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв, Україна
[3]Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

**Анотація.** В роботі автори наводять результати розробки математичної моделі для визначення фізичного обсягу ІТ-проєктів банківських установ. Основним завданням є побудова нелінійної регресійної моделі для квантифікації обсягу ІТ-проєкту банківських установ. Об'єктом дослідження є процес управління змістом банківських ІТ-проєктів; предмет дослідження – математична модель кількісної оцінки обсягу робіт. Методи дослідження: застосовано метод множинної нелінійної регресії, аналіз функціональних точок (FPA) з урахуванням галузевої специфіки, статистичний аналіз історичних даних міжнародного репозиторію ISBSG, а також метод крос-валідації. Результати дослідження: доведено статистичну незначущість частини стандартних параметрів FPA для ІТ-проєктів банківських установ. Побудовано оптимізовану нелінійну двофакторну модель, що базується виключно на обсягах транзакційної логіки та системних інтеграцій. Її використання дозволяє відкинути інформаційний шум, суттєво підвищити точність оцінки ресурсомісткості на ранніх етапах планування та мінімізувати ризики «розповзання змісту».

**Ключові слова**: ІТ-проєкт, фізичний обсяг, математична модель, функціональні точки, обсяг проєкту.

# MATHEMATICAL MODEL FOR THE QUANTIFICATION OF THE PHYSICAL SIZE OF IT PROJECTS IN BANKING INSTITUTIONS

**Božo Soldo[1], Haidaienko O.V.[2], Serik O.A.[2], Morhulets O.B.[3]**
[1]University North, Koprivnica, Croatia
[2]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
[3]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** In this paper, the authors present the results of developing a mathematical model for determining the physical size of IT projects in banking institutions. The main objective is to build a non-linear regression model to quantify the size of IT projects in banking institutions. The object of the research is the scope management process of banking IT projects; the subject of the research is a mathematical model for the quantitative assessment of the scope of work. Research methods: the study employs multiple non-linear regression, Function Point Analysis (FPA) tailored to industry specifics, statistical analysis of historical data from the ISBSG international repository, and the cross-validation method. Research results: the study proves the statistical insignificance of a portion of standard FPA parameters for IT projects in banking institutions. An optimized non-linear two-factor model has been constructed, based exclusively on the volumes of transactional logic and system integrations. Its use allows discarding informational noise, significantly improves the accuracy of resource estimation at early planning stages, and minimizes the risks of scope creep.

**Keywords**: IT project, physical size, mathematical model, function points, project scope.

**Вступ.** Оцінка обсягу ІТ-проєкту є критично важливим аспектом для ефективної реалізації розробки проєктів, що безпосередньо впливає на розподіл ресурсів, терміни та загальний успіх проєкту. Точне оцінювання залишається актуальною проблемою для банківських установ, оскільки традиційні методики не враховують специфічну для галузі складність.

**Мета роботи**. Розробити регресійну математичну модель для кількісної оцінки фізичного обсягу ІТ-проєктів банківських установ на основі статистичного аналізу історичних даних функціональних компонентів.

**Постановка проблеми**. ІТ-проєкти в банківських установах характеризуються високим рівнем складності, зумовленим взаємозалежністю численних компонентів та змінних, що істотно впливають на кінцеві результати реалізації проєкту. Як зазначається в [1], обмеженість ресурсів, високі ризики перевитрат бюджету та жорсткі терміни є ключовими бар'єрами для банківських установ. За таких умов традиційні підходи (наприклад, стандарт IFPUG), що зводяться до вимірювання розміру в абстрактних функціональних точках, не дають менеджеру проєкту об'єктивного розуміння реальної ресурсомісткості на фазі планування проєкту. Неточність оцінки ресурсомісткості та відсутність об'єктивних метрик є головними каталізаторами «розповзання змісту», що руйнують довіру стейкхолдерів та призводять до перевитрат бюджету [2].

Основне завдання полягає у розробці підходу до квантифікації фізичного обсягу змісту проєкту шляхом переходу від якісного опису функціональних вимог до кількісного виміру трудомісткості через побудову множинної нелінійної регресії.

**Основна частина**. Створення математичної моделі спрямоване на допомогу менеджерам ІТ-проєктів в ефективному визначенні оцінки фізичного обсягу ІТ-проєкту для прийняття подальших управлінських рішень.

Як встановлено у роботі [3], метод функціональних точок усуває залежність оцінки від суб'єктивного сприйняття виконавців та є інваріантним щодо обраних технологій програмування, що дозволяє проводити кількісне вимірювання на ранніх етапах життєвого циклу.

Автори [4] промоделювали підходи щодо використання функціональних точок, і дійшли висновку, що для оцінки трудомісткості необхідно використовувати саме категорії функціональних точок як предиктори, а не загальний бал AFP. Стверджується, що врахування галузевої специфіки підвищує якість моделі. Доведено, що додавання інших параметрів погіршує предикативну здатність моделі.

В роботі [5] запропонований підхід до визначення фізичного обсягу через аналіз функціональних точок [6] з урахуванням галузевої специфіки.

Для побудови математичної моделі використаний датасет ISBSG [7] з історичними даними ІТ-проєктів банківських установ. З датасету використані дані проєктів з інформацією про функціональні точки і трудомісткість розробки всього проєкту.

Сумарний фізичний обсяг проєкту (виражений у людино-годинах) розраховується як функція від квантифікованих базових компонентів методу FPA: зовнішніх входів (EI), виходів (EO), запитів (EQ), внутрішніх логічних файлів (ILF) та зовнішніх інтерфейсів (EIF). Перехід від функціональних точок до трудомісткості є не управлінням часом, а саме кількісним оцінюванням змісту проєкту. Тривалість залежить від кількості ресурсів, тоді як трудомісткість є незмінною характеристикою самого обсягу робіт. У межах дослідження людино-години виступають не інструментом календарного планування, а інваріантною мірою самого фізичного обсягу змісту. Такий підхід є логічним доповненням концептуальної моделі управління змістом [8], де етап поверхневої оцінки достатності ресурсів визначено як обов'язковий перед затвердженням базового плану проєкту. Запропонована модель вирішує задачу трансформації якісного опису вимог у кількісний вимір фізичного обсягу.

За результатами статистичного аналізу історичних даних датасету ISBSG встановлено, що змінні EO, EQ та ILF не мають критичного впливу на загальну трудомісткість банківського проєкту. Основна складність зосереджена в реалізації інтеграційної взаємодії (EIF) та транзакційної логіки (EI). Отже, після виключення статистично незначущих параметрів, математична модель оцінки фізичного обсягу робіт для банківських інформаційних систем набуває вигляду (формула 1):

$$Y = 58.2 \cdot EI^{0.62} \cdot EIF^{0.39}, \quad (1)$$

де

$Y$ – трудомісткість функціонального обсягу проєкту. Інтегральний показник фізичного обсягу змісту, виражений через нормовані витрати праці. Одиниця виміру - людино-години;

*EI* – визначає сумарну кількість функціональних точок з функціями вводу даних;

*EIF* – визначає сумарну кількість функціональних точок інтеграцій зі зовнішніми інтерфейсами;

58.2 – константа моделі, що визначає мінімальні трудовитрати проєкту;

0.62 і 0.39 – коефіцієнти регресії для заданих параметрів функційних точок (у разі нульового обсягу за одним із факторів, його значення для розрахунку прирівнюється до 1).

Дослідження специфіки управління ІТ-проєктами у банківському секторі [1] доводить, що ключовим викликом є необхідність складної інтеграції нових цифрових рішень із застарілою інфраструктурою банків, а також вимоги до кібербезпеки та нормативного комплаєнсу. Оптимізація моделі до двох факторів (EI та EIF) дозволяє менеджерам проєктів відкинути інформаційний шум та фокусуватися на головних чинниках складності вже на етапі збору первинних вимог.

Математична модель (формула 1) побудована на вибірці з 95 ІТ-проєктів банківських установ, коефіцієнт детермінації $R^2$ становить 0.66. Для перевірки моделі проведено тестування методом крос-валідації, що підтвердило її стабільність та відсутність ефекту перенавчання.

**Висновки**. У дослідженні вирішено науково-прикладну задачу підвищення точності оцінки обсягу ІТ-проєктів банківських установ. Побудована нелінійна двофакторна регресійна модель емпірично довела, що для банківської галузі значна частина стандартних параметрів аналізу функціональних точок не має визначального впливу на загальну трудомісткість розробки. Оптимізована модель базується виключно на обсягах транзакційних входів та зовнішніх інтерфейсів. Запропонований метод дозволяє перейти від абстрактного вимірювання функціональності до точної оцінки фізичного обсягу проєкту. Використання трудомісткості як залежної змінної дозволяє врахувати галузеву специфіку банківських ІТ-проєктів та підвищити точність планування змісту, уникаючи ефекту «розповзання змісту» через недооцінку складності окремих функцій.

## Список використаних джерел


1. Annam S. Innovation in IT project management for banking systems. International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering. 2020. 9(10), P. 19–31. URL: https://www.researchgate.net/publication/389089324_Innovation_in_IT_Project_Management_for_Banking_Systems
2. Ruk S. A., Mahmood Y., Azmi A., Mohd Azmi N. F., Gul S. Effort Estimation in Agile and DevOps: A Systematic Literature Review of Stakeholder Dissatisfaction. IEEE Access. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/396310580_Effort_Estimation_in_Agile_and_DevOps_A_Systematic_Literature_Review_of_Stakeholder_Dissatisfaction
3. Серік О. А., Гайдаєнко О. В. Технології управління змістом ІТ-проєктів банку. Управління розвитком складних систем. 2024. № 59. С. 89–96. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.59.89-96.
4. Hoc H. T., Silhavy R., Prokopova Z., Silhavy P. Comparing multiple linear regression, deep learning and multiple perceptron for functional points estimation. IEEE Access. 2022. 10, 112187–112198. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3215987
5. Серік О.А. Регресійна модель оцінки фізичного обсягу ІТ-проєктів банківських установ на основі функціональних точок. Project, Program, Portfolio Management. P3M-2025: матеріали X міжнар. наук.-практ. конф., 28 – 29 лист. 2025 р., Одеса, 2025. С.58-60. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.18428325
6. ISO/IEC 20926:2009. Software and systems engineering — Software measurement — IFPUG functional size measurement method. Geneva : ISO, 2009. 54 p.
7. International Software Benchmarking Standards Group. URL: https://www.isbsg.org/home/
8. Гайдаєнко О. В., Серік О. А. Інтегрована модель управління змістом ІТ-проєктів банку. *Інформаційні технології та комп'ютерна техніка.* 2025. № 3. С.1-10. DOI: https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-3-55-64

# РОЛЬ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УПРАВЛІННІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСАМИ

**Бойко В.[1], Підгорний М.[1], Литовченко В.[2]**
[1] Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
[2] Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Черкаси, Україна.

**Анотація.** У роботі досліджено роль інформаційних систем в управлінні бізнес-процесами підприємства в умовах цифрової трансформації галузі економіки. Проведено аналізовано основних класів інформаційних систем, зокрема ERP, CRM, BPM та BI, а також визначено їх вплив на ефективність управління. Особливу увагу приділено застосуванню новітніх підходів, таких як process mining, штучний інтелект та цифрові двійники (digital twin). Запропоновано концепцію гібридних адаптивних інформаційних систем, що забезпечують проактивне управління бізнес-процесами.
**Ключові слова:** бізнес-процеси, інформаційні системи, BPM, ERP, цифровізація, process mining, штучний інтелект.

# THE ROLE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT

**Boiko V.[1], Pidhornyy M.[1], Litovchenko V.[2]**
[1] Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2] State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Cherkasy, Ukraine.

**Abstract.** This paper examines the role of modern information systems in managing business processes at enterprises in the context of the digital transformation of the economy. It analyzes the main classes of information systems, including ERP, CRM, BPM, and BI, and identifies their impact on management effectiveness. Particular attention is paid to the latest approaches, such as process mining, artificial intelligence, and digital twins. A concept of hybrid adaptive information systems is proposed, which ensures proactive management of business processes.
**Keywords:** business processes, information systems, BPM, ERP, digital transformation, process mining, artificial intelligence.

**Вступ.** Сучасний стан розвитку економіки характеризується активною цифровізацією, що суттєво трансформує підходи до управління підприємствами [2]. В умовах глобальної конкуренції, швидких змін ринкового середовища та зростання об’ємів даних підприємства потребують впровадження новітніх інформаційних технологій для підвищення ефективності діяльності. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності є адаптивне управління бізнес-процесами BPM (Business Process Management), яке передбачає системний підхід до організації діяльності підприємства. Інформаційна система стає основою реалізації BPM, забезпечуючи моніторинг, автоматизацію та оптимізацію процесів. Незважаючи на дослідження у цій сфері, питання інтеграції інтелектуальних технологій у системи управління бізнес-процесами залишається недостатньо дослідженими, що зумовлює актуальність даного дослідження.

**Мета роботи.** Дослідження інформаційних систем управління бізнес-процесами та визначення перспектив їх еволюції в умовах цифрової трансформації економіки.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: провести аналіз, сутність та роль інформаційних систем у BPM; визначити сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій у бізнесі; дослідити основні класи сучасних інформаційних систем; обґрунтувати новий підхід до управління бізнес-процесами на основі гібридних адаптивних систем. Актуальність дослідження полягає у переході від традиційної автоматизації бізнес-процесів до концепції адаптивних інтелектуальних бізнес-систем, які здатні аналізувати бізнес-процеси та пропонувати оптимізаційні рішення в режимі реального

часу. Новизною є акцент на застосування гібридних адаптивних систем управління які поєднують штучний інтелект, процесний майнінг (process mining) та цифрові двійники (digital twin) бізнес-процесів. Такий підхід дозволяє не лише реагувати на зміни, а й прогнозувати їх, формуючи проактивну модель управління, що недостатньо висвітлено в більшості існуючих наукових робіт інших авторів.

**Вирішення проблеми.** Управління бізнес-процесами є концепцією, що передбачає системний підхід до аналізу, моделювання, виконання, моніторингу та оптимізації діяльності підприємства [1]. З позицій системного аналізу підприємство розглядається як складна відкрита система, що складається з взаємопов'язаних елементів і функціонує під впливом зовнішнього середовища. У цьому контексті BPM виступає інструментарієм формалізації, декомпозиції та синтезу бізнес-процесів як підсистем єдиної організаційної системи $\Sigma$ в системні постановці.

Структуру системи авторами подано у вигляді $\Sigma = (A, \omega)$ , де $A$ – початкові дані, $\omega$ – структура виду характеризується парою $(\phi, \psi) \in \omega$, де $\phi: A \to \mathrm{B(N)}$, $\psi: A \to \mathrm{B(N)}$.

Позначимо: вхід системи $U = \left(\bigcup\limits_{a \in A} \phi(a)\right) / \left(\bigcup\limits_{a \in A} \psi(a)\right)$; множина зв'язків системи $\Sigma$ $S = \left(\bigcup\limits_{a \in A} \phi(a)\right) \cup \left(\bigcup\limits_{a \in A} \psi(a)\right)$; вихід системи $U = \left(\cup \psi(a)\right) / \left(\bigcup\limits_{a \in A} \phi(a)\right)$.

Основною метою BPM є підвищення ефективності функціонування організації, забезпечення її гнучкості та адаптивності до змін зовнішнього середовища [2]. Застосування методів системного аналізу дозволяє здійснити ідентифікацію структури процесів, встановити причинно-наслідкові зв'язки між їх елементами, а також оцінювати вплив окремих факторів на результати діяльності підприємства.

Бізнес-процес визначається як сукупність взаємопов'язаних та структурованих впливів, спрямованих на створення цінності для споживача. Сукупність $E$ елементів бізнес-процесів та відповідність $H: E \to A$, що визначає для кожного елементу $e \in E$ його місце $H(e)$ в структурі бізнес-процесів. У межах системного підходу бізнес-процеси розглядаються як функціональні компоненти організаційної системи, що взаємодіють між собою через інформаційні, матеріальні та фінансові потоки.

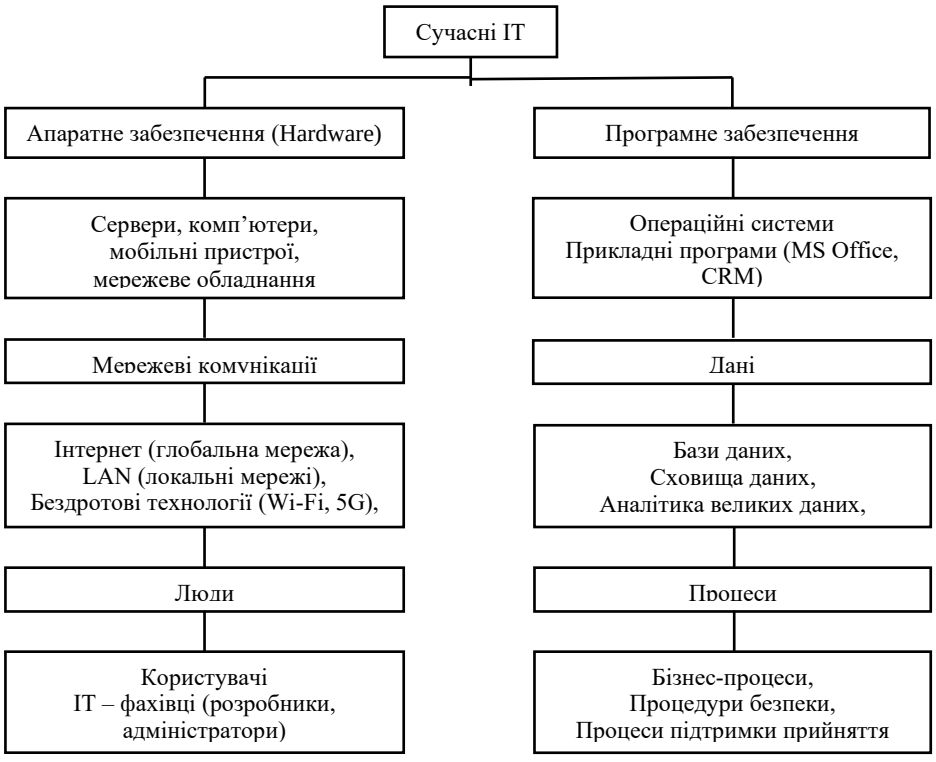



Рис. 1. Модель переходу від функціонального до процесного підходу в управлінні

Дослідження підкреслює важливість переходу від функціонального до процесного підходу в управлінні (рис. 1). Відповідно, ефективне управління бізнес-процесами є ключовим фактором підвищення конкурентоспроможності підприємства, оскільки забезпечує узгодженість функціонування всіх його підсистем, оптимізацію використання ресурсів та підвищення якості управлінських рішень. Застосування системного аналізу, зокрема моделювання, оптимізації та прогнозування, дозволяє формувати науково обґрунтовані підходи до вдосконалення бізнес-процесів підприємства.

Сучасні інформаційні системи в управлінні бізнес-процесами представлені такими класами рішень, як CRM, ERP, SCM, BPM-системи та аналітичні платформи [2]. Їх основною функцію є інтеграція даних, забезпечення прозорості процесів та формуванні ефективних механізмів управління на основі зворотних зв'язків. З позицій системного підходу такі інформаційні системи реалізують повний цикл обробки інформації — від збору та передачі до аналітики та підтримки прийняття рішень які дозволяють підвищити адаптивність організаційної системи підприємства.

Основним аспектом є інтеграція вказаних вище технологій у єдину гібридну адаптивну інформаційну екосистему, що забезпечує безперервний цикл керування: від збору даних до прийняття стратегічних управлінських рішень.

Традиційні інформаційні системи здебільшого функціонують у межах моделі управління [1], що обмежує їх здатність до прогнозування та самостійної оптимізації бізнес-процесів. У зв'язку з цим наукової актуальності набуває інтеграція цих систем у межах гібридних адаптивних інформаційних систем, які поєднують можливості BPM, process mining, аналітичних платформ та технологій штучного інтелекту.

Таким чином, представлений підхід відображає перехід від ізольованих інформаційних систем до єдиної гібридної адаптивної системи управління бізнес-процесами, що функціонує на основі принципів системного аналізу, інтеграції та зворотних зв'язків.

Запропонований підхід передбачає формування єдиного інтелектуального середовища управління, в якому реалізуються механізми самоаналізу, прогнозування та автоматизованого прийняття рішень. З позицій системного аналізу така інтеграція забезпечує перехід від статичної структури управління до динамічної адаптивної системи, здатної до саморегуляції на основі безперервного аналізу даних і змін зовнішнього середовища.

Таким чином, розвиток сучасних інформаційних систем у напрямі гібридизації створює передумови для переходу до проактивної моделі управління бізнес-процесами, що є ключовим елементом запропонованої наукової новизни дослідження.

**Висновок.** Отже, сучасні інформаційні системи є невід'ємним інструментом ефективного управління бізнес-процесами, розвиток яких спрямований у бік інтелектуалізації, адаптивності та прогнозування. Запропонований підхід застосування гібридних інтелектуальних систем відкриває нові можливості підвищення конкурентоспроможності підприємства. У майбутньому бачиться, що такі системи стануть основою автономного управління бізнесом, де роль людини трансформується з операційного управління до стратегічного контролю.

Запропонована авторами концепція гібридних інформаційних систем дозволяє підвищити ефективність діяльності підприємств та забезпечити їх конкурентоспроможність в умовах цифрової економіки.

Перспективами подальших досліджень бачиться в розробці методів оцінювання ефективності зазначених систем та їх впливу на стратегічний розвиток підприємства.

## Список використаних джерел


1. Laudon K. C., Laudon J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. 16th ed. New York : Pearson, 2020. 669 p.
2. Пономаренко В. С. Інформаційні системи і технології в управлінні підприємством : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2020. 350 с.

# МОДЕЛІ ХМАРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ

**Гайдабрус Б.В.[1], Данченко О.Б.[2], Скакун П.П.[2], Коваленко А.С.[3], Коваленко О.В.[3]**
[1]Ризький технічний університет, м. Рига, Латвія
[2]Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
[3]Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

**Анотація.** У роботі обґрунтовано актуальність розроблення хмарної інформаційної технології управління знаннями в ІТ-проєктах в умовах цифрової трансформації, поширення багатохмарних середовищ, розподілених команд і активного використання інструментів штучного інтелекту. Запропоновано комплекс моделей такої технології, що поєднує концептуальний, процесний та математичний рівні опису. Представлено концептуальну модель 5-K, яка визначає ключові компоненти хмарної бази знань, ролі учасників та логіку доступу до знань. Описано процесну модель CIKML, що формалізує життєвий цикл управління знаннями як безперервний цикл підготовки, інтеграції, контекстного надання, використання, аналітики й оновлення знань. Показано, що математична модель забезпечує кількісне оцінювання результативності управління знаннями і обґрунтування рішень щодо пріоритетів оновлення артефактів знань за умов обмеженого ресурсу. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованого комплексу моделей для побудови та подальшої апробації хмарних систем управління знаннями в ІТ-проєктах.
**Ключові слова:** управління знаннями, ІТ-проєкти, хмарна інформаційна технологія, база знань, концептуальна модель, процесна модель, математична модель.

# MODELS OF CLOUD INFORMATION TECHNOLOGY FOR KNOWLEDGE MANAGEMENT IN IT PROJECTS

**Haidabrus B.[1], Danchenko O.[2], Skakun P.[2], Kovalenko A.[3], Kovalenko O.[3]**
[1]Riga Technical University, Riga, Latvia
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[3]Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

**Abstract.** This paper substantiates the relevance of developing cloud information technology for knowledge management in IT projects in the context of digital transformation, multi-cloud environments, distributed teams, and intensive use of artificial intelligence tools. An integrated set of models for this technology is proposed, combining conceptual, process, and mathematical levels of description. The conceptual 5-K model defines the key components of a cloud knowledge base, participant roles, and the logic of access to knowledge. The CIKML process model formalizes the knowledge management lifecycle as a continuous cycle of preparation, integration, contextual delivery, use, analytics, and knowledge updating. It is shown that the mathematical model provides a quantitative evaluation of knowledge management effectiveness and supports decision-making on priorities for updating knowledge artifacts under limited resources. The practical value of the results lies in the possibility of using the proposed integrated set of models for the design and further testing of cloud knowledge management systems in IT projects.
**Keywords**: knowledge management, IT projects, cloud information technology, knowledge base, conceptual model, process model, mathematical model.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні ІТ-проєкти реалізуються в умовах прискореної цифрової трансформації, зростання складності програмних і хмарних рішень, поширення віддалених і гібридних форматів взаємодії команд [1; 2], а також активного використання інструментів штучного інтелекту. За таких умов знання стають критично важливим ресурсом проєкту, від якого залежить якість технічних і управлінських рішень. Водночас у практиці ІТ-проєктів зберігаються такі типові проблеми, як розпорошеність знань між різними каналами комунікації, втрата актуальності документації, втрата контексту рішень унаслідок кадрових ротацій, а також нечітка регламентація процедур перевірки, оновлення та повторного використання знань [2–4].

У багатьох організаціях база знань досі розглядається переважно як сховище документів, тоді як для ІТ-проєктів цього вже недостатньо [2; 4]. У реальних умовах знання

виникають не лише у формі документів, а й у вигляді технічних рішень, коментарів у системах керування завданнями, матеріалів DevOps-процесів, командних комунікацій, уроків проєкту (lessons learned), експертних пояснень, неявних знань та контексту прийняття рішень, який часто не фіксується в документованому вигляді. Саме тому виникає потреба у хмарній інформаційній технології управління знаннями, яка забезпечує їх структурування, верифікацію, контекстне надання, актуалізацію та повторне використання в межах життєвого циклу IT-проєкту.

**Метою роботи** є розроблення комплексу моделей хмарної інформаційної технології управління знаннями в IT-проєктах, який поєднує концептуальний, процесний та математичний рівні опису й створює підґрунтя для побудови цілісної системи управління знаннями в хмарному інформаційному середовищі.

Концептуальний рівень представлено авторською моделлю 5-K (Knowledge, Know, Keys, Communication, Cloud Knowledge Company's Base) [5]. Її призначення полягає у визначенні структурної побудови хмарної бази знань як соціотехнічної системи, яка поєднує технологічні компоненти, людей, правила, ролі та комунікації. У цій моделі компонент Knowledge репрезентує кодифіковані артефакти знань, зокрема управлінські, технічні, експлуатаційні та організаційні матеріали. Компонент Know відображає людську експертизу, носіїв знань, карту компетентностей і відповідальність за підтримання знань в актуальному стані. Компонент Keys визначає правила опису, класифікації, пошуку, доступу до артефактів знань та контролю їх якості. Компонент Communication охоплює середовище професійної взаємодії, у межах якого уточнюються рішення, виявляються відсутні або недостатньо опрацьовані знання та формується новий зміст знань. Компонент Cloud Knowledge Company's Base виступає хмарною інтеграційною платформою, яка технічно об'єднує попередні компоненти в єдине середовище. Таким чином, модель 5-K визначає, з яких елементів має складатися система управління знаннями в IT-проєкті та якою є логіка їх взаємозв'язку.

Процесний рівень представлено моделлю CIKML (Cloud Intelligent Knowledge Management Lifecycle), розробленою у нотації IDEF0, загальну логіку якої подано на рис. 1 [6].

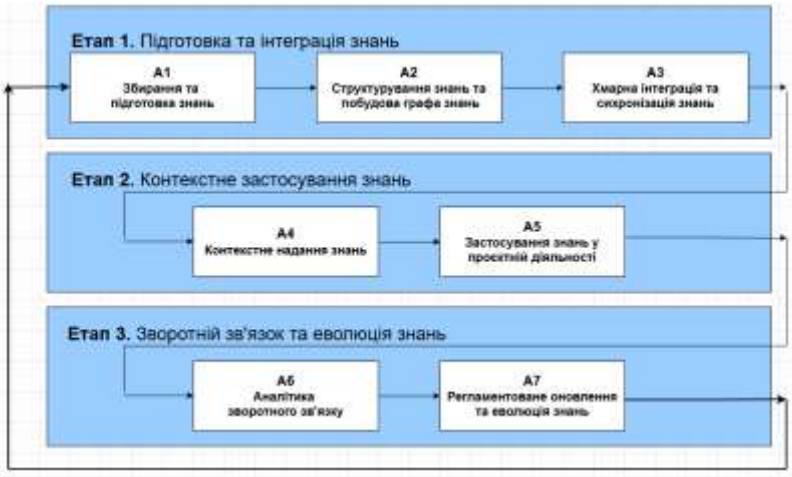



Рис. 1. Функціональна декомпозиція процесної моделі CIKML (A1-A7)

На відміну від концептуальної моделі, що відповідає на питання «з чого складається система», процесна модель визначає, як саме знання проходять життєвий цикл у межах IT-проєкту. Модель CIKML формалізує управління знаннями як безперервний цикл, який охоплює три узагальнені етапи. Першим етапом є підготовка та інтеграція знань, що передбачає збирання, структурування, змістове узгодження та хмарну синхронізацію знань із проєктних артефактів, технічних джерел і командних комунікацій.

Другим етапом є контекстне застосування знань, що забезпечує доступ команди до потрібних знань у момент виникнення робочої потреби та їх застосування. Третім етапом є зворотний зв'язок та оновлення знань, що охоплює аналіз результатів використання знань, виявлення артефактів, що втратили актуальність або не забезпечують належної якості, і подальше їх оновлення відповідно до потреб проєкту. Завдяки цьому CIKML визначає

замкнений цикл безперервного вдосконалення, у якому знання не накопичуються пасивно, а постійно еволюціонують відповідно до потреб проєкту.

Однак наявність концептуальної та процесної моделей не забезпечує кількісного оцінювання результативності управління знаннями. Тому третім рівнем комплексу моделей є математична модель, у якій знання подано як сукупність артефактів, стан яких оцінюється за чотирма показниками: якістю, актуальністю, інтенсивністю використання та рівнем повторного використання. На основі цих показників вводиться інтегральний показник результативності управління знаннями, який відображає динаміку практичної цінності артефактів знань у часі. Зростання інтегрального показника свідчить про належну якість, актуальність і реальне використання артефактів знань командою. Ключова наукова ідея моделі полягає у формалізації механізму зворотного зв'язку CIKML як задачі керування оновленням артефактів знань за умов обмеженого ресурсу. Таким чином, модель забезпечує перехід від інтуїтивного оновлення знань до формалізованого управління на основі визначених показників і критеріїв.

Отже, поєднання моделей 5-K, CIKML і математичної моделі формує цілісний комплекс моделей хмарної інформаційної технології управління знаннями в IT-проєктах. Концептуальна модель визначає структурну побудову системи, процесна модель формалізує життєвий цикл знань, а математична модель забезпечує кількісне оцінювання результативності та підтримку управлінських рішень щодо оновлення знань. Це дає можливість перейти від фрагментарного і несистемного підходу до системного та придатного до масштабування управління знаннями в хмарному інформаційному середовищі.

**Висновки**. У роботі обґрунтовано доцільність розроблення хмарної інформаційної технології управління знаннями в IT-проєктах як відповіді на виклики цифрової трансформації, розподіленої командної взаємодії та високої динаміки змін. Запропоновано комплекс моделей такої технології, що охоплює концептуальний, процесний і математичний рівні. Концептуальна модель 5-K визначає структурну побудову системи управління знаннями, процесна модель CIKML формалізує життєвий цикл знань як замкнений безперервний цикл, а математична модель забезпечує кількісне оцінювання результативності та підтримку рішень щодо пріоритетів оновлення артефактів знань. Наукова новизна полягає у формалізації механізму зворотного зв'язку як задачі керування оновленням знань за умов обмеженого ресурсу. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованого комплексу моделей для проєктування, впровадження та подальшої апробації хмарної інформаційної технології управління знаннями в IT-проєктах.

## Список використаних джерел


1. Gartner. Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending to Total $723 Billion in 2025 [Електронний ресурс]. 2024. URL: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-11-19-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-total-723-billion-dollars-in-2025.
2. Natu S., Aparicio M. Analyzing knowledge sharing behaviors in virtual teams: practical evidence from digitalized workplaces. Journal of Innovation & Knowledge. 2022. Vol. 7, No. 4. Article 100248. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100248.
3. Robillard M. P. Turnover-induced knowledge loss in practice. Proceedings of the 29th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE 2021). New York : ACM, 2021. P. 1292–1302. DOI: https://doi.org/10.1145/3468264.3473923.
4. Theunissen T., van Heesch U., Avgeriou P. A mapping study on documentation in continuous software development. Information and Software Technology. 2022. Vol. 142. Article 106733. DOI: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106733.
5. Скакун П. П., Данченко О. Б., Коваленко А. С. Концептуальна модель управління знаннями в IT-проєктах : тези доповіді III Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні системи та інноваційні технології управління проєктами і програмами» (Харків – Коблево, 15–20 верес. 2025 р.). Харків : ХНУРЕ, 2025.
6. Данченко О. Б., Скакун П. П. Процесна модель управління знаннями CIKML (Cloud Intelligent Knowledge Management Lifecycle) в IT-проєктах : тези доповіді X Міжнародної наук.-практ. конф. PЗМ – Project, Program, Portfolio Management (PЗМ-2025) (Одеса, онлайн, 28–29 листоп. 2025 р.). Одеса, 2025.

# ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СТЕЙКХОЛДЕРАМИ В ТРАНСПОРТНИХ ПРОЄКТАХ

**Гайдабрус Б.В.[1], Кравчук І.В.[2], Заяц О.В.[2], Борисов О.В.[3]**
[1]Ризький технічний університет, Рига, Латвія,
[2] Національний транспортний університет, Київ, Україна,
[3]ТОВ "Девлаб Україна", м. Київ, Україна

**Анотація.** У роботі досліджено проблему оцінювання ефективності управління взаємодією зі стейкхолдерами в транспортних проєктах в умовах цифрової трансформації. Метою є розроблення інформаційно-аналітичної моделі та системи кількісних індикаторів для оцінювання stakeholder engagement і визначення його впливу на результати проєктів. Об'єктом дослідження є процеси взаємодії зі стейкхолдерами, предметом — методи та моделі їх оцінювання. Використано методи системного аналізу, експертного оцінювання, анкетування, контент-аналізу та економетричного аналізу. Запропоновано інтегральний показник рівня взаємодії та data-driven підхід до управління. Наукова новизна полягає у формалізації "м'яких" характеристик взаємодії у вигляді кількісних індикаторів та їх інтеграції в інформаційно-аналітичну модель. Додатково обґрунтовано доцільність застосування методів штучного інтелекту для прогнозування поведінки стейкхолдерів.

**Ключові слова:** управління стейкхолдерами, транспортні проєкти, інформаційні системи, data-driven управління, аналітичні моделі

# INFORMATION-ANALYTICAL MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF STAKEHOLDER MANAGEMENT IN TRANSPORT PROJECTS

**Haidabrus B.V.[1], Kravchuk I.V.[2], Zaiats O.V.[2], Borysov O.V.[3]**
[1] Riga Technical University, Riga, Latvia,
[2] National Transport University, Kyiv, Ukraine,
[3] Devlab Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses the problem of evaluating stakeholder interaction effectiveness in transport projects under digital transformation. The aim is to develop an information-analytical model and a system of quantitative indicators for assessing stakeholder engagement and its impact on project outcomes. The object of the study is stakeholder interaction processes, while the subject is methods and models for their evaluation. The study applies system analysis, expert evaluation, surveys, content analysis, and econometric analysis. A composite interaction index and a data-driven management approach are proposed. The scientific novelty lies in formalizing "soft" interaction characteristics into measurable indicators and integrating them into an analytical model. Additionally, the feasibility of applying AI-based methods for predictive analysis is substantiated.

**Keywords:** stakeholder management, transport projects, information systems, data-driven management, analytical models

**Вступ.** У сучасних умовах трансформації транспортної галузі України, що супроводжується цифровізацією, інтеграцією до європейської логістичної системи та відновленням інфраструктури, зростає значення ефективного управління проєктами. Особливої актуальності набуває управління взаємодією зі стейкхолдерами, оскільки узгодженість інтересів учасників визначає результати реалізації проєктів. Транспортні проєкти характеризуються високою складністю, мультиакторністю та значною кількістю взаємозалежних рішень в умовах невизначеності [1], що обмежує ефективність традиційних підходів.

Розвиток інформаційних технологій сприяв формуванню підходів, у яких ефективність систем оцінюється на основі кількісних індикаторів [2]. У цьому контексті управління взаємодією зі стейкхолдерами доцільно розглядати як інформаційно-аналітичну систему, у якій процеси взаємодії підлягають формалізації та подальшому аналізу.

**Постановка задачі.** Аналіз наукових джерел свідчить про відсутність уніфікованого підходу до кількісного оцінювання взаємодії зі стейкхолдерами. Такі характеристики, як довіра, задоволеність та залученість, залишаються складними для формалізації [3]. Крім того, недостатньо досліджено взаємозв'язок між параметрами взаємодії та результативністю проєктів [4].

**Мета дослідження.** Розроблення інформаційно-аналітичної моделі оцінювання ефективності взаємодії зі стейкхолдерами та обґрунтування її використання в управлінні транспортними проєктами.

**Основна частина.** Запропоновано підхід, що базується на формалізації ключових характеристик взаємодії у вигляді системи кількісних індикаторів, які відображають рівень задоволеності, довіри, активності участі та ефективності комунікацій.

На основі цих індикаторів формується інтегральний показник взаємодії, структура якого враховує специфіку транспортних проєктів. Пріоритет надається активності участі як фактору координації, тоді як довіра та задоволеність забезпечують стабільність взаємодії, а комунікації виконують підтримуючу функцію.

У межах запропонованого підходу оцінювання ефективності управління взаємодією зі стейкхолдерами формалізується через інтегральний показник, що агрегує ключові характеристики взаємодії, зокрема рівень задоволеності, довіри, залученості та якості комунікацій. Відповідна залежність може бути представлена у вигляді адитивної моделі:

$$SE = \omega_1 \cdot S + \omega_2 \cdot T + \omega_3 \cdot E + \omega_4 \cdot C,$$

де *SE* характеризує узагальнений рівень взаємодії зі стейкхолдерами, *S, T, E, C* — відповідні складові (*S* — показник задоволеності; *T* — показник довіри; *E* — показник залученості (активності участі); *C* — показник якості комунікацій), а вагові коефіцієнти $\omega_i$ відображають їх відносну значущість. Збільшення окремого показника на одиницю зумовлює пропорційне зростання інтегрального значення на величину відповідного коефіцієнта, що дозволяє трактувати їх як міру внеску кожного фактора за інших рівних умов. Нормування $\sum \omega_i = 1$ забезпечує узгодженість оцінювання.

Розвитком запропонованого підходу є реалізація концепції data-driven управління, яка передбачає орієнтацію на використання кількісних даних як основи для прийняття управлінських рішень. У такій інтерпретації система аналітичних індикаторів виконує не лише функцію оцінювання, а й виступає джерелом структурованої інформації про стан та динаміку взаємодії зі стейкхолдерами.

Застосування data-driven підходу забезпечує можливість безперервного моніторингу параметрів взаємодії, виявлення тенденцій їх зміни та своєчасного реагування на відхилення від цільових значень. Це дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень за рахунок переходу від експертно-інтуїтивного до аналітично обґрунтованого управління, що відповідає сучасним підходам до побудови інформаційних систем управління підприємствами [2; 5]. Крім того, накопичення та систематизація даних створює передумови для застосування методів прогнозної аналітики та машинного навчання, що дозволяє здійснювати оцінювання ймовірних сценаріїв розвитку взаємодії та прогнозування ризиків. У цьому контексті data-driven підхід виступає методологічною основою для інтеграції економетричних моделей та інтелектуальних методів аналізу в єдину інформаційно-аналітичну систему управління проєктами [3; 4].

Подальший розвиток моделі передбачає встановлення зв'язку між інтегральним рівнем взаємодії та результативністю проєкту, що може бути описано у вигляді лінійної залежності:

$$P = \alpha + \beta \cdot SE + \varepsilon,$$

де *P* — інтегральний показник результативності, $\alpha$ — базовий рівень, $\beta$ — коефіцієнт впливу, а $\varepsilon$ — випадкова складова. Коефіцієнт $\beta$ відображає граничний ефект зміни рівня взаємодії на результативність, тоді як ε акумулює вплив неврахованих факторів.

Якість побудованої моделі доцільно оцінювати за допомогою коефіцієнта детермінації $R^2$, який визначає частку варіації результативного показника, пояснену моделлю. З формальної точки зору, цей показник відображає співвідношення між поясненою та

загальною варіацією залежної змінної. Високе значення $R^2$ свідчить про те, що зміни результативності проєкту значною мірою зумовлені рівнем взаємодії зі стейкхолдерами, що підтверджує адекватність обраної моделі та релевантність включених факторів. Водночас слід враховувати, що навіть за високих значень $R^2$ частина варіації залишається неврахованою, що обґрунтовує доцільність подальшого розширення моделі.

У цьому контексті доцільним є узагальнення моделі з урахуванням нелінійності та складності взаємозв'язків, що характерні для соціально-економічних систем. Відповідно, результативність проєкту може бути представлена у вигляді функціональної залежності:

$$P = f(S, T, E, S),$$

де функція $f = (\cdot)$ апроксимується з використанням методів машинного навчання. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійні ефекти, взаємодію факторів та приховані закономірності, що не відображаються у лінійних моделях.

Таким чином, запропонована модель забезпечує послідовний перехід від агрегування окремих характеристик взаємодії до побудови аналітичних і прогностичних інструментів, що створює методичну основу для інтеграції інтелектуальних технологій у систему управління проєктами.

Отже управління взаємодією зі стейкхолдерами розглядається як інформаційно-аналітична система, у якій вхідними елементами виступають дані різної природи, зокрема результати опитувань, експертних оцінок, контент-аналізу комунікацій та цифрові сліди взаємодії. На етапі обробки ці дані підлягають нормуванню та трансформації в систему аналітичних індикаторів, що відображають ключові характеристики взаємодії, зокрема рівень задоволеності, довіри, активності участі та ефективності комунікацій.

Подальше опрацювання інформації передбачає інтеграцію зазначених індикаторів у єдину аналітичну модель, результати якої можуть бути використані для оцінювання стану взаємодії та підтримки прийняття управлінських рішень. На цьому етапі система доповнюється інтелектуальними модулями, що реалізують алгоритми машинного навчання та дозволяють здійснювати прогнозування поведінки стейкхолдерів, ідентифікацію ризиків взаємодії, виявлення аномальних відхилень і оцінювання потенційного впливу змін у взаємодії на результати проєкту.

Інтеграція інструментів штучного інтелекту забезпечує перехід від фіксації поточного стану системи до її прогностичного аналізу. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих на опис існуючих характеристик взаємодії, застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє виявляти приховані закономірності, оцінювати ймовірність виникнення конфліктних ситуацій, а також визначати тенденції зміни рівня довіри та залученості. Додатково використання методів виявлення аномалій забезпечує своєчасну ідентифікацію нетипових змін у комунікаційній активності, тоді як рекомендаційні алгоритми сприяють вибору найбільш ефективних управлінських дій.

Результатом функціонування такої системи є формування аналітичного середовища підтримки прийняття рішень, що включає візуалізацію ключових параметрів взаємодії, генерацію рекомендацій та обґрунтування управлінських рішень щодо оптимізації взаємодії зі стейкхолдерами. Таким чином, маємо узагальнену логіку трансформації первинних даних у аналітичні висновки та управлінські дії, відображаючи управління стейкхолдерами як цілісну інформаційно-аналітичну систему.

Запропонована структуризація дозволяє не лише формалізувати процеси взаємодії, але й забезпечити їх кількісне оцінювання та подальший аналіз, створюючи підґрунтя для застосування як класичних аналітичних методів, так і сучасних інтелектуальних підходів до прогнозування та підтримки управління в умовах складних транспортних систем.

У межах базового аналізу можуть використовуватися економетричні методи для виявлення загальних закономірностей. Водночас ключовим напрямом є застосування методів машинного навчання, що дозволяють виявляти складні залежності та формувати прогностичні оцінки.

У такій інтерпретації управління стейкхолдерами постає як інформаційно-аналітична система, де дані трансформуються в аналітичні висновки та управлінські рішення. Використання інструментів штучного інтелекту забезпечує перехід від описового до прогнозного рівня аналізу, включаючи виявлення ризиків, аномалій і формування рекомендацій.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його застосування в діяльності транспортних підприємств, органів державного управління та інфраструктурних проєктів України. Використання інформаційно-аналітичної моделі дозволяє підвищити якість управлінських рішень, знизити рівень конфліктності між учасниками, оптимізувати комунікаційні процеси та забезпечити більш ефективну координацію дій. Особливо актуальним є впровадження такого підходу в умовах післявоєнного відновлення транспортної інфраструктури, де необхідна узгоджена взаємодія великої кількості стейкхолдерів, включаючи державні інституції, міжнародні організації та приватний сектор.

Таким чином, запропонований підхід формує методичне та інструментальне підґрунтя для розвитку сучасних систем управління проєктами, орієнтованих на підвищення ефективності транспортних проєктів. Його практична реалізація відкриває можливості для подальшого вдосконалення механізмів управління взаємодією зі стейкхолдерами, зокрема шляхом поглиблення аналітичних методів, розширення використання інтелектуальних технологій та інтеграції у цифрові екосистеми управління.

**Висновки.** Управління взаємодією зі стейкхолдерами доцільно розглядати як інформаційно-аналітичну систему, у межах якої процеси взаємодії трансформуються у структуровані дані та підлягають аналітичній обробці. Це забезпечує перехід до формалізованого управління, заснованого на використанні кількісних параметрів.

Застосування data-driven підходу дозволяє здійснювати системний моніторинг взаємодії, виявляти тенденції її розвитку та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень. Інтеграція аналітичних інструментів у цифрові платформи забезпечує цілісність інформаційного середовища та прозорість управління.

Використання сучасних аналітичних інструментів, зокрема методів штучного інтелекту та машинного навчання, дозволяє розширити функціональні можливості системи за рахунок переходу від ретроспективного аналізу до прогнозування. Це забезпечує виявлення прихованих закономірностей, оцінювання ризиків взаємодії та формування адаптивних управлінських рішень, що є критично важливим в умовах високої невизначеності та складності транспортних проєктів.

Інтеграція запропонованого підходу з концепціями сучасних інформаційних систем управління, зокрема ERP, CRM та BI, дозволяє розглядати управління стейкхолдерами як складову єдиного цифрового середовища проєктної діяльності. Це забезпечує узгодженість процесів, підвищує ефективність використання ресурсів та сприяє досягненню стратегічних цілей проєктів.

## Список використаних джерел


1. Кравчук І. В., Литвишко Л. О. Управління стейкхолдерами проєктів транспортних підприємств. *Економіка та держава*. 2023. № 10. С. 45–50. URL: https://www.economy.in.ua/pdf/10_2023/10.pdf
2. Aaltonen K., Kujala J. Project stakeholder management: A systematic literature review. *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34(8). P. 1536–1555. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.006
3. Bushuyev S. D., Bushuyeva N. S. Digital transformation of project management. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 169. P. 534–540. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.02.212
4. Bourne L. Stakeholder Relationship Management. London: Gower, 2009. URL: https://www.routledge.com/Stakeholder-Relationship-Management/Bourne/p/book/9780566088129
5. Olander S. Stakeholder impact analysis in construction project management. *Construction Management and Economics*. 2007. Vol. 25(3). P. 277–287. DOI: https://doi.org/10.1080/01446190600879125

# МЕТОД ПРЕДИКТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ PROCESS MINING ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Головко О.[1], Данченко О.[2]**
[1]Університет економіки та права «КРОК», Київ, Україна
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси,Україна

**Анотація.** Розглянуто проблему підвищення ефективності управління бізнес-процесами організацій в умовах цифрової трансформації. Метою дослідження є обґрунтування методу предиктивної оптимізації бізнес-процесів на основі інтеграції технологій Process Mining та алгоритмів машинного навчання. Об'єктом дослідження виступають бізнес-процеси організацій у цифровому середовищі, а предметом – моделі та методи їх оптимізації на основі аналізу процесних даних інформаційних систем. У дослідженні використано методи системного аналізу, структурно-логічного моделювання, Process Mining, машинного навчання та аналізу даних. Запропоновано алгоритм предиктивної оптимізації бізнес-процесів, який передбачає збір і підготовку журналів подій, побудову процесної моделі, формування ознак та навчання прогнозних моделей для виявлення ризиків і неефективностей виконання процесів. Отримані результати демонструють можливість переходу від ретроспективного аналізу процесів до їх предиктивного управління, що сприяє підвищенню ефективності прийняття управлінських рішень та оптимізації операційної діяльності організацій.

**Ключові слова:** оптимізація бізнес-процесів, цифрова трансформація, Process Mining, машинне навчання, предиктивна аналітика, управління бізнес-процесами.

# METHOD OF PREDICTIVE OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL BUSINESS PROCESSES BASED ON PROCESS MINING AND MACHINE LEARNING

**Holovko O.[1], Danchenko O.[2]**
[1]PhD student, KROK University, Kyiv, Ukraine
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper considers the problem of improving the efficiency of business process management in organizations under conditions of digital transformation. The purpose of the study is to substantiate a method for predictive optimization of business processes based on the integration of Process Mining technologies and machine learning algorithms. The object of the study is the business processes of organizations operating in a digital environment, while the subject of the research is the models and methods of their optimization based on the analysis of process data from information systems. The research applies methods of system analysis, structural and logical modeling, Process Mining, machine learning, and data analysis. An algorithm for predictive optimization of business processes is proposed, which includes the collection and preprocessing of event logs, the discovery of a process model, feature extraction, and the training of predictive models to identify potential risks and inefficiencies in process execution. The obtained results demonstrate the possibility of transitioning from retrospective process analysis to predictive process management, which contributes to improving the effectiveness of managerial decision-making and optimizing the operational activities of organizations.

**Keywords:** business process optimization, digital transformation, Process Mining, machine learning, predictive analytics, business process management.

**Вступ.** У сучасних умовах цифрової економіки діяльність організацій супроводжується інтенсивним зростанням обсягів даних, що генеруються корпоративними інформаційними системами. Цифрова трансформація змінює підходи до управління бізнес-процесами, оскільки більшість операцій фіксується у вигляді журналів подій (event logs) в ERP, CRM та BPM-системах. Такі дані відображають фактичне виконання процесів і створюють нові можливості для їх аналітичного дослідження та оптимізації [1, 4].

Традиційні підходи до оптимізації бізнес-процесів, зокрема BPR, BPM та Lean-менеджмент, здебільшого базуються на експертному аналізі та статичних моделях, що

обмежує можливість оперативного реагування на зміни у середовищі функціонування організацій [2].

Сучасні дослідження акцентують увагу на застосуванні цифрових аналітичних технологій, зокрема Process Mining, машинного навчання та аналізу великих даних. Інтеграція цих інструментів формує підхід предиктивної оптимізації бізнес-процесів, який дозволяє не лише аналізувати виконані процеси, але й прогнозувати можливі відхилення та забезпечувати проактивне управління діяльністю організації.

**Мета роботи.** Метою дослідження є розробка методу предиктивної оптимізації бізнес-процесів організації на основі технологій Process Mining та алгоритмів машинного навчання, який забезпечує прогнозування відхилень у виконанні процесів та підвищення ефективності управління ресурсами підприємства [1, 5].

**Постановка задачі.** У сучасних організаціях бізнес-процеси характеризуються високою складністю та значною кількістю можливих сценаріїв виконання, що зумовлено обробкою великих обсягів інформації, взаємодією різних підрозділів і використанням численних інформаційних систем. Унаслідок цього виникають проблеми, серед яких найпоширенішими є затримки виконання операцій, перевантаження ресурсів, відхилення від регламентованих процедур та зниження ефективності їх використання [2, 3].

Однією з причин таких проблем є відсутність інструментів, здатних прогнозувати відхилення у виконанні процесів. Більшість систем управління бізнес-процесами фіксують лише факт виконання операцій, але не забезпечують можливості прогнозування їх подальшого перебігу. Тому актуальною науковою задачею є розробка методів аналізу та оптимізації бізнес-процесів, що використовують дані журналів подій для прогнозування можливих відхилень і підтримки прийняття управлінських рішень [1]. Одним із перспективних напрямів є створення методу предиктивної оптимізації бізнес-процесів на основі інтеграції технологій Process Mining та машинного навчання [5].

**Основна частина.** Застосування технології Process Mining у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяє перейти від традиційного аналізу процесів до використання підходів, орієнтованих на дані (data-driven management). У межах такого підходу аналіз бізнес-процесів здійснюється на основі фактичних даних, що генеруються інформаційними системами організації.

Журнал подій бізнес-процесу можна формально представити у вигляді множини записів

$$L = \{(c_i, a_i, t_i, r_i)\},$$

де $c_i$ – ідентифікатор екземпляра бізнес-процесу;

$a_i$ – виконана операція або активність;

$t_i$ – момент часу виконання операції;

$r_i$ – ресурс або виконавець, який здійснює операцію.

Аналіз журналів подій дозволяє відновити фактичну модель виконання бізнес-процесу, виявити відхилення від регламентованих сценаріїв та оцінити ефективність використання ресурсів. На відміну від традиційного моделювання процесів, яке базується на експертних оцінках, Process Mining дозволяє отримати модель процесу, що відображає реальну поведінку системи.

У запропонованому дослідженні предиктивна оптимізація бізнес-процесів розглядається як багатоступеневий процес, який включає декілька взаємопов’язаних етапів.

Етап 1 – збір журналів подій інформаційних систем;

Етап 2 – побудова фактичної моделі бізнес-процесу (Process Mining);

Етап 3 – формування ознак виконання процесу;

Етап 4 – навчання моделей машинного навчання;

Етап 5 – прогнозування відхилень у виконанні процесу;

Етап 6 – формування рекомендацій щодо оптимізації.

Перший етап передбачає збір журналів подій із корпоративних інформаційних систем, у результаті чого формується масив даних, що відображає реальну послідовність виконання операцій у бізнес-процесі. Другий етап полягає у побудові фактичної моделі бізнес-процесу

за допомогою технології Process Mining, яка відображає послідовність операцій, їх взаємозв'язки та можливі сценарії виконання процесу. На наступному етапі формується набір ознак, що характеризують виконання процесу, зокрема тривалість операцій, використання ресурсів, кількість повторень дій та інші параметри, які відображають особливості процесу.

Використовуючи сформований набір ознак, здійснюється навчання моделей машинного навчання, що дозволяють прогнозувати можливі відхилення у виконанні бізнес-процесів. Для побудови прогнозних моделей застосовуються різні алгоритми машинного навчання, кожен з яких орієнтований на розв'язання певних аналітичних завдань у процесному середовищі. Зокрема, алгоритм Random Forest використовується для прогнозування можливих затримок виконання процесу, Gradient Boosting застосовується для оцінювання ймовірного часу завершення процесу, нейронні мережі (Neural Networks) дозволяють виявляти складні нелінійні залежності між параметрами процесу, а алгоритми LSTM (Long Short-Term Memory) ефективно використовуються для прогнозування послідовностей подій у процесах [5].

Для оцінювання ефективності бізнес-процесів запропоновано використовувати інтегральну функцію ефективності

$$F = \alpha \cdot T + \beta \cdot C + \gamma \cdot R,$$

де T – середній час виконання процесу;

C – витрати на виконання процесу;

R – рівень використання ресурсів;

α, β, γ – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного з параметрів.

Метою оптимізації є мінімізація функції ефективності: $F \rightarrow \min$.

Крім того, ймовірність виникнення відхилення у виконанні бізнес-процесу визначається за допомогою предиктивної моделі $P(d) = f(x_1, x_2, \dots x_n)$, де $x_i$ – параметри процесу, що характеризують його поточний стан.

Використання таких моделей дозволяє прогнозувати можливі проблеми у виконанні процесів ще до їх виникнення та формувати управлінські рішення, спрямовані на підвищення ефективності діяльності організації.

**Висновки.** У результаті дослідження проаналізовано сучасні підходи до оптимізації бізнес-процесів в умовах цифрової трансформації та встановлено обмежені можливості традиційних методів щодо прогнозування відхилень у виконанні процесів. Запропоновано метод предиктивної оптимізації бізнес-процесів на основі інтеграції технології Process Mining та алгоритмів машинного навчання, а також розроблено математичну модель оцінювання ефективності процесів, що враховує часові, ресурсні та економічні параметри. Практичне застосування запропонованого підходу сприяє підвищенню ефективності управління бізнес-процесами, зменшенню ризику відхилень та більш раціональному використанню ресурсів організації. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні систем підтримки управлінських рішень у сфері управління бізнес-процесами підприємств.

## Список використаних джерел


1. Головко О. В., Ткаченко Ф. В. Цифровізація бізнес-процесів: передумови та тенденції. Управління розвитком складних систем, (62), 62–71. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.62-71.
2. Данченко О. Б. Управління бізнес-процесами підприємства. Київ : КНЕУ, 2021.
3. Бушуєв С. Д., Бушуєва Н. С. Управління проєктами в умовах цифрової трансформації економіки. Київ : КНУБА, 2020.
4. Ареф'єва О. В., Ткаченко А. М. Управління розвитком підприємств в умовах цифрової економіки. Київ : НАУ, 2021.
5. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. Fundamentals of Business Process Management. 2nd ed. Berlin : Springer, 2018. 527 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4.

# ЦИФРОВИЙ ПРОТОТИП БАНКУ СЦЕНАРІЇВ УПРАВЛІННЯ КОНФЛІКТАМИ ЯК МОДУЛЯ БАЗИ ЗНАНЬ ПРОЄКТУ

**Gorska M.[1], Федотова Н.[2], Катаєв Д.[3], Бугайчук В.[3]**
[1]WSHIU Academy of Applied Sciences, Poznan, Poland
[2]Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна
[3]Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі обґрунтовано доцільність проєктування Банку сценаріїв управління конфліктами як спеціалізованого цифрового модуля бази знань проєкту. Актуальність теми зумовлена потребою збереження, структурування та повторного використання конфліктного досвіду, який у проєктній діяльності часто залишається неформалізованим і не переходить у формат організаційної пам'яті. Метою роботи є наукове обґрунтування та проєктування концептуального цифрового прототипу Банку сценаріїв, призначеного для накопичення, пошуку, адаптації та повторного використання знань про врегулювання конфліктів упродовж життєвого циклу проєкту. Методологічною основою дослідження є підхід, орієнтований на проєктування артефактів. Теоретичну основу становлять модель перетворення знань SECI, концепція подвійного навчання та принцип єдиного джерела істини. У результаті дослідження запропоновано архітектуру цифрового прототипу, яка поєднує шаблони сценаріїв, реальні приклади врегулювання конфліктів, командний стандарт управління конфліктами, фазову організацію за життєвим циклом проєкту, а також блоки узагальнення, аналізу, пошуку й адаптації сценаріїв. Показано, що такий підхід дає змогу перетворити конфліктний досвід на структуроване організаційне знання, придатне до повторного використання в наступних проєктах.

**Ключові слова:** управління конфліктами, управління знаннями, база знань проєкту, Банк сценаріїв управління конфліктами, цифровий прототип, життєвий цикл проєкту.

# DIGITAL PROTOTYPE OF A CONFLICT MANAGEMENT SCENARIO BANK AS A PROJECT KNOWLEDGE BASE MODULE

**Gorska M.[1], Fedotova N.[2], Kataiev D.[3], Bugaichuk V.[3]**
[1]WSHIU Academy of Applied Sciences, Poznan, Poland
[2]KROK University, Kyiv, Ukraine
[3]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper substantiates the feasibility of designing a Conflict Management Scenario Bank as a specialized digital module of a project knowledge base. The relevance of the topic is determined by the need to preserve, structure and reuse conflict-related experience, which often remains unformalized in project activities and is not transformed into organizational memory. The purpose of the paper is to substantiate and design a conceptual digital prototype of the Scenario Bank aimed at supporting the accumulation, search, adaptation and reuse of knowledge on conflict resolution throughout the project life cycle. The methodological basis of the study is the design science approach, while the theoretical basis includes the SECI knowledge conversion model, the concept of double-loop learning and the principle of a single source of truth. As a result, the architecture of the digital prototype is proposed, integrating scenario templates, real examples of conflict resolution, a team conflict management standard, phase-based organization according to the project life cycle, and blocks for generalization, analysis, search and adaptation of scenarios. It is shown that this approach enables the transformation of conflict-related experience into structured organizational knowledge suitable for reuse in future projects.

**Keywords**: conflict management, knowledge management, project knowledge base, Conflict Management Scenario Bank, digital prototype, project life cycle.

**Вступ.** У сучасних умовах управління проєктами дедалі більше залежить не лише від ресурсного забезпечення, строків і бюджету, а й від здатності організації накопичувати, осмислювати та повторно використовувати знання, що виникають у процесі проєктної діяльності. Водночас, за даними APQC, більшість організацій і далі не досягли високої зрілості практик управління знаннями, а накопичений досвід часто залишається недостатньо

структурованим і слабко інтегрованим у подальшу діяльність [1]. Особливо складним для формалізації є конфліктний досвід, оскільки він має контекстний, динамічний і значною мірою неявний характер. Унаслідок цього знання про причини конфліктів, логіку їх розвитку, прийняті рішення та результати врегулювання нерідко не переходять у формат організаційної пам'яті, а залишаються лише на рівні індивідуального досвіду учасників проєкту. Потреба в системному збереженні, пошуку, адаптації та оновленні такого досвіду зумовлює доцільність створення спеціалізованого цифрового модуля для роботи зі знаннями про врегулювання конфліктів у проєктному середовищі.

**Мета роботи.** Метою роботи є наукове обґрунтування та проєктування концептуального цифрового прототипу Банку сценаріїв управління конфліктами як спеціалізованого модуля бази знань проєкту, призначеного для накопичення, пошуку, адаптації та повторного використання конфліктного досвіду.

**Постановка задачі.** Попри визнання важливості управління конфліктами та управління знаннями, ці напрями залишаються недостатньо інтегрованими. Конфліктний досвід найчастіше фіксується фрагментарно як інформація про окрему подію, але не перетворюється на структуроване знання, придатне для повторного використання. Для ефективного застосування такий досвід має бути поданий як сценарій управлінських дій, пов'язаний із фазою життєвого циклу проєкту, типом конфлікту, прийнятими рішеннями, результатами врегулювання та набутими уроками. Тому науково-прикладне завдання полягає в обґрунтуванні та проєктуванні спеціалізованого цифрового модуля, який у межах єдиного інформаційного середовища забезпечує накопичення, структурування, пошук, адаптацію та повторне використання знань про врегулювання конфліктів упродовж життєвого циклу проєкту.

**Вирішення проблеми.** Методологічною основою дослідження є підхід, орієнтований на проєктування артефактів [2], а теоретичну основу становлять модель перетворення знань SECI [3], концепція подвійного навчання [4] та принцип єдиного джерела істини. У результаті дослідження спроєктовано архітектуру Банку сценаріїв управління конфліктами як спеціалізованого модуля бази знань проєкту. Запропоноване рішення спирається на попереднє узагальнення сучасних моделей і методів управління конфліктами у проєктах [5].

Структурну логіку запропонованого цифрового прототипу подано на рис. 1.




Рис. 1. Концептуальна архітектура Банку сценаріїв управління конфліктами як модуля бази знань проєкту

Джерело: складено авторами.

Центральним елементом архітектури є Банк сценаріїв, інтегрований із життєвим циклом проєкту та пов’язаний із єдиним джерелом істини — базою знань проєкту. У межах цього модуля визначено три основні змістові блоки: шаблони сценаріїв, реальні приклади врегулювання конфліктів і командний стандарт управління конфліктами. Шаблони сценаріїв містять відтворювані алгоритми дій для типових конфліктних ситуацій. Реальні приклади врегулювання конфліктів акумулюють документований досвід у логіці «контекст — рішення — результат — урок», а командний стандарт визначає порядок, умови та правила використання сценаріїв у командній взаємодії. Архітектура також включає блок узагальнення та аналізу, призначений для систематизації накопиченого досвіду й виявлення повторюваних типів конфліктів, а також блок пошуку та адаптації сценаріїв, що забезпечує добір релевантного сценарію залежно від фази проєкту, типу конфлікту та наявних реальних прикладів. Така побудова дає змогу перейти від пасивного зберігання конфліктного досвіду до його активного використання як ресурсу підтримки управлінських рішень.

Запропонований Банк сценаріїв забезпечує замкнений цикл руху знань: конфліктна ситуація → пошук і вибір сценарію → застосування сценарію → документування прикладу врегулювання конфлікту → фіксація набутих уроків → оновлення Банку сценаріїв → повторне використання знань у наступних проєктах. Наявність такого циклу забезпечує перехід від ситуативного реагування на конфлікт до системного організаційного навчання, що узгоджується з логікою подвійного навчання [4]. Внутрішня логіка сценарної роботи з конфліктами також узгоджується з авторським підходом до синкретичного управління конфліктами в проєктах [6].

**Висновок**. Запропоновано концептуальний цифровий прототип Банку сценаріїв управління конфліктами як спеціалізованого модуля бази знань проєкту. Його архітектура поєднує шаблони сценаріїв, реальні приклади врегулювання конфліктів, командний стандарт, а також блоки узагальнення, аналізу, пошуку й адаптації сценаріїв у межах єдиного цифрового простору. Одержаний результат полягає в поєднанні управління конфліктами та управління знаннями через цифрову організацію конфліктного досвіду у формі сценаріїв, придатних до повторного використання. Практичне значення запропонованого рішення полягає у створенні передумов для використання такого досвіду як ресурсу підтримки управлінських рішень і організаційного навчання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення повнофункціональної версії системи, її апробацію в проєктному середовищі та визначення показників оцінювання результативності Банку сценаріїв.

## Список використаних джерел


1. APQC. 2026 Knowledge Management Priorities and Trends Survey Report [Електронний ресурс]. Houston: APQC, 2026. URL: https://www.apqc.org/resource-library/resource-listing/2026-knowledge-management-priorities-and-trends-survey-report (дата звернення: 27.04.2026).
2. Hevner A. R., March S. T., Park J., Ram S. Design science in information systems research. *MIS Quarterly*. 2004. Vol. 28, No. 1. P. 75–105. DOI: https://doi.org/10.2307/25148625.
3. Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. New York : Oxford University Press, 1995. 304 p.
4. Argyris C., Schön D. A. *Organizational learning II: Theory, method, and practice*. Reading : Addison-Wesley, 1996. 305 p.
5. Данченко О. Б., Федотова Н. О. Огляд сучасних моделей і методів управління конфліктами у проєктах. Управління розвитком складних систем. 2024. № 60. С. 44–55. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.44-55.
6. Данченко О. Б., Федотова Н. О. Синкретичне управління конфліктами в проєктах. Вчені записки Університету «КРОК». 2025. Вип. 2(78). С. 245–255. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-78-245-255.

# СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЄКТНО-ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ БІЗНЕСОМ

**Гулич В.В., Міхелєв І.Л.**
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна

**Анотація.** Розглянуто проєктно-процесне управління торговельними організаціями, як управлінську методологію, що дозволяє інтегрувати проєктний та процесний підхід в єдину систему. Запропонована модель, яка відображає причинно-наслідкові взаємозв'яки в системі «проєкт-бізнес-процес». Відмічено, що практична реалізація та ефективність проєктно-процесного управління досягається через комплексне ІТ-рішення.

**Ключові слова**: інформаційна технологія, проєктно-процесний підхід, причинно-наслідкові взаємозв'яки, управління, торговельні організації.

# MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES OF PROJECT AND PROCESS MANAGEMENT OF BUSINESS

**Gulych V.V., Mikhelev I.L.**
National Shipbuilding University named after Admiral Makarov, Mykolaiv, Ukraine

**Abstract.** Project and process management of commercial organizations is considered a management methodology that allows integrating the project and process approach into a single system. A model is proposed that reflects the cause-and-effect relationships in the "project-business-process" system. It is noted that the practical implementation and effectiveness of project and process management are achieved through a comprehensive IT solution.

**Keywords:** information technology, project-process approach, cause-and-effect relationships, management, trade organizations.

**Вступ.** Невизначеність та загрози сучасного світу вимагають від фахівців будь-якої галузі постійного пошуку нових підходів та вдосконалення існуючих. Проєктно-процесне управління саме той підхід, який дозволяє гнучко та швидко реагувати на можливі виклики й ефективно реалізувати проєкт. Він забезпечує взаємодію стратегічних цілей із операційною діяльністю, що й утворює систему ефективного управління, яка дозволяє організаціям бути конкурентоспроможними.

**Мета роботи**. Мета роботи полягає у дослідженні взаємного впливу проєктів та бізнес-процесів та сучасних ІТ-рішень, які забезпечують практичну реалізацію проєктно-процесного підходу.

**Постановка проблеми**. Особливості проєктно-процесного підходу розкриваються через удосконалення бізнес-процесів та впровадження сучасних технологій, які реалізуються на методологічній основі управління проєктам [1]. Тому, питання взаємного впливу проєктів та процесів в рамках проєктно-процесного підходу є досить актуальним.

**Основна частина**. Запропонована модель, яка розкриває причинно-наслідкові взаємозв'язки проєктів та бізнес-процесів, що дозволяє продемонструвати «фактори впливу» на ефективність проєктно-процесного підходу.

Торговельні організації одночасно можуть реалізовувати декілька проєктів ($P$) в межах своїх бізнес-процесів ($BP$):

$$P = (P_1, P_2, \cdots P_i, \cdots, P_N), i = \overline{1, N},$$

де $N$ – кількість проєктів організації у певний період часу.

$$BP = \left(BP_1, BP_2, \cdots BP_j, \cdots, BP_M\right), j = \overline{1, M},$$

де $M$ – кількість бізнес-процесів організації.

Для кожного бізнес-процесу $BP_i$ може бути своя множина проєктів:

$$P_i = \left(P_{i1}, P_{i2}, \cdots P_{ij}, \cdots, P_{iMi}\right).$$

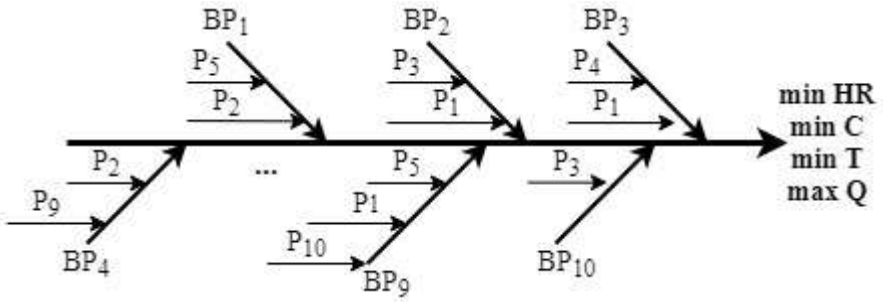



Рис. 1. Вплив проєктів на бізнес-процеси

На рис.1 продемонстрована модель впливу проєктів на зміни бізнес-процесів. Така модель дозволяє проєктному менеджеру, спираючись на виявлені зв'язки, оперативно адаптувати процесну діяльність до ринкових змін та мінімізувати дублювання функцій.

Якщо мова йде про взаємозв'язок, то можливий і вплив бізнес-процесів на проєкти. На рис.2 продемонстрована модель впливу бізнес-процесів на проєкти, що дозволяє проєктному менеджеру враховуючі операційні обмеження, забезпечити реалізацію проєктних рішень.

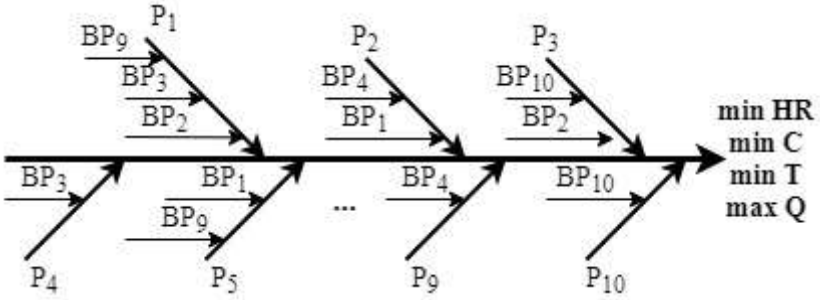



Рис. 2. Вплив бізнес-процесів на проєкти

Така модель проєктно-процесного управління може бути успішно реалізована завдяки сучасним IT-рішенням, що робить їх необхідною умовою ефективного управління.

Аналізуючи відкриту базу даних Internet-сайтів, що пропонують інформаційні технології для операційної та проєктної діяльності бізнесу, можна виділити наступні найбільш поширені рішення.

Enterprise Resource Planning (ERP) виступає інформаційною підтримкою для основних бізнес-процесів, забезпечуючих управління запасами, ціноутворення, фіноблік, закупівлі, логістику торговельних організацій [2]. Дана система реалізує операційну складову проєктно-процесної IT структури.

Система управління бізнес-процесами представлена BPMS – системою, яка орієнтується на моделювання та покращення керованості БП, аналіз результативності процесів в реальному часі, виявлення та усунення проблемних ділянок процесів.

Bizagi Process Modeler – це інструмент побудови бізнес-процесів, який призначений для створення діаграм процесів та генерування документації в нотації BPMN – стандарту, який і дозволяє системі будувати діаграми в режимі реального часу, що робить можливим здійснювати контроль за виконанням завдань.

ARIS Express засіб моделювання сімейства ARIS (ARchitecture of Integrated Information Systems), який забезпечує менеджерів інструментами моделювання бізнес-процесів, інтегрує між собою засоби розробки системи збалансованих показників, оцінки та оптимізації вартості бізнес-процесів, інструменти контролю за виконанням бізнес-процесів.

Платформа Camunda застосовується для автоматизації, моделювання БП.

BPEL – це стандарт проєктування та виконання бізнес-процесів.

Серед спеціалізованих IT-інструментів для торговельних організацій, потрібно відмітити Warehouse Management Systems (WMS) – систему, яка забезпечує управління бізнес-процесами, що пов'язані із автоматизацією прийому, зберігання, транспортування

товарів та допомагає створювати журнал подій, аналізуючи який менеджер може виявити проблемні місця логістики [3].

Ще один з інструментів управління БП, виступає Customer Relationship Management (CRM) платформа, яка відображає історію взаємодії із клієнтами. Серед українських систем даного класу, можна виділити Perfectum CRM, як багатофункціональну систему, що поєднує усі канали зв'язку, автоматизацію бізнес-процесів та управління проєктами в єдиній платформі [4].

Окремо треба визначити Worksection CRM, як CRM-модуль, інтегрований у систему управління проєктами Worksection, що поєднує функціональні можливості CRM із можливостями командної роботи проєктних менеджерів. Така інтеграця забезпечує комплексність до управління проєктами, клієнтами, задачами [4].

Платформа QPM допомагає керувати проєктами різної складності з повною прозорістю, контролем та ефективністю. Забезпечує автоматизацію призначення задач, виявляє потенційні ризики, об'єднує команду в єдиному просторі.

Серед IT-рішень для управління проєктами, крім відомого MSProject, можна представити коплесне ПЗ FlexiProject, яке забезпечує проєктних менеджерів інструментами планування та успішного виконання проєктів будь-яких масштабів.

Платформа Wrike призначена для управління багатофункціональними проєктами, дозволяючи налаштовувати командні робочі простори, автоматизуючи процес ведення робіт.

Серед систем, що працюють за методологією гнучкого управління, найбілшь популярна система Asana, що дозволяє створювати списки справ та представляти їх у різних формах.

Таким чином, сучасний ринок IT пропонує широкий спектр інструментарію для ефективного управління проєктами та бізнес-процесами, що дозволяє проєктним менеджерам адаптувати проєктні рішення до змін операційного середовища, забезпечити узгодженість між цілями проєктів та поточними БП торговельних організацій.

**Висновки**. Проєктно-процесне управління є підходом, що відображає складність операційного середовища сучасного бізнесу.

Запропонована модель демонструє взаємний вплив, де проєкти є рушієм удосконалення бізнес-процесів, а операційна складова через свої обмежання та параметри формують умови, в яких реалізуються проєктні рішення.

Реалізація запропонованої моделі стає можливою завдяки сучасним IT-рішенням, кожен з яких вирішує свої управлінські задачі.

Тому, ефективність проєктно-процесного управління торговельними організаціями визначається здатністю формувати збалансований інтегрований комплекс інформаційних технологій, де кожен компонент підсилює дію іншого, забезпечуючи злагоджену роботу системи.

## Список використаних джерел


1. Михелєв І. Л., Гулич В. В. Проєктно-процесне управління організаціями. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. № 61. С. 86 – 92, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2025.61.86-92.
2. Hariantoa K.J., et al. (2024) The effect of digital ERP implementation, supply chain integration and supply chain flexibility on business performance. *International Journal of Data and Network Science* 8, 2399–2414; doi: 10.5267/j.ijdns.2024.5.017
3. Vaičiūtė Kristina, and Katinienė Aušra (2025). Improving the Information Systems of a Warehouse as a Critical Component of Logistics: The Case of Lithuanian Logistics Companies. *Systems*, 13(3), 186; URL: https://doi.org/10.3390/systems13030186
4. ТОП-10 українських CRM-систем. Офіційний сайт One consulting service. URL: https://www.oneservice-consulting.com/top-10-ukrainskikh-crm-sistem

# ЦИКЛІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ КОНФЛІКТАМИ В IT-ПРОЄКТАХ В СЕРЕДОВИЩІ AGILE/DEVOPS

**Денчик О.[1], Оксамитна Л.[2], Торба Т.[2], Мисник Б.[3]**
[1]J. Rettenmaier & Sohne GmbH & Co. KG, Rosenberg, Germany
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси,Україна
[3]Черкаський національний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** Роботу присвячено розробці циклічної моделі управління конфліктами в розподілених IT-проєктах, що використовують методології Agile та DevOps. Обґрунтовано необхідність інтеграції конфлікт-менеджменту в гнучкі процеси через високий комунікаційний потенціал напруги в розподілених командах. Запропонована модель реалізує концепцію креативного управління конфліктами на трьох рівнях: алгоритмічному, психологічному та ціннісному. Представлено способи органічної інтеграції цих рівнів у стандартні події Agile Ключова особливість моделі – перетворення конфлікту з проблеми на ресурс розвитку без впровадження окремих процесів, що підвищує стійкість та ефективність команд.

**Ключові слова**: Управління конфліктами, Agile-методології, DevOps, розподілені IT-команди, циклічна модель, аналіз даних.

# CYCLIC CONFLICT MANAGEMENT MODEL IN IT-PROJECTS IN THE AGILE/DEVOPS ENVIRONMENT

**Denchyk O.[1], Oksamytna L.[2], Torba T.[2], Mysnyk B.[3]**
[1]J. Rettenmaier & Sohne GmbH & Co. KG, Rosenberg, Germany
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[3]Cherkasy National University named after B. Khmelnytskyi, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The work is devoted to the development of a cyclic conflict management model in distributed IT projects utilizing Agile and DevOps methodologies. The necessity of integrating conflict management into agile processes is substantiated due to the high communication tension potential in distributed teams. The proposed model implements the concept of creative conflict management at three levels: algorithmic, psychological, and value-based. Methods for the organic integration of these levels into standard Agile events are presented. The key feature of the model is the transformation of conflict from a problem into a development resource without introducing separate processes, thereby enhancing team resilience and efficiency.

**Keywords**: conflict management, agile methodologies, DevOps, distributed IT teams, cyclic model, data analytics.

**Вступ.** Сучасна індустрія розробки програмного забезпечення значною мірою базується на використанні методології Agile та DevOps, які забезпечують гнучкість, швидку доставку цінності та безперервне вдосконалення процесів . Agile орієнтований на ітеративну розробку та тісну взаємодію команди зі стейкхолдерами, тоді як DevOps інтегрує процеси розробки та експлуатації для прискорення доставки програмного продукту [1, 2]. Водночас висока швидкість змін, асинхронна комунікація та географічна розподіленість команд формують значний конфліктний потенціал. За даними Standish Group, значна частка невдач IT-проєктів пов'язана з проблемами комунікації та управління вимогами [3]. Тому виникає необхідність створення моделей управління конфліктами, адаптованих до середовища Agile/DevOps [4].

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка циклічної моделі управління конфліктами в розподілених IT-проєктах як прикладної реалізації концептуальної моделі креативного управління конфліктами.

**Постановка проблеми.** Процеси управління IT-проєктами в умовах високої динаміки змін та розподіленої роботи команди характеризуються підвищеною складністю

комунікацій. Традиційні реактивні підходи до вирішення конфліктів часто не забезпечують своєчасного виявлення проблем та їх конструктивного розв'язання.

У середовищі Agile/DevOps конфлікти можуть виникати через:

– технічні розбіжності між розробниками;

– протиріччя між швидкістю поставки та стабільністю систем;

– непорозуміння в асинхронній комунікації розподілених команд.

Тому актуальним є створення моделі, що дозволяє системно інтегрувати управління конфліктами у процеси Agile та DevOps.

**Основна частина.** Запропонована циклічна модель управління конфліктами розглядає конфлікт як природний елемент розвитку команди та включає три взаємопов'язані рівні, що відповідають структурі концептуальної моделі [4].

Алгоритмічний рівень спрямований на раннє виявлення конфліктних ситуацій за допомогою аналізу даних та використання методів штучного інтелекту. Зокрема, застосовуються методи нечіткої логіки [5] для аналізу командної динаміки та прогнозування ризиків конфліктів у розподілених командах [6]. Джерелом даних можуть бути DevOps-інструменти та системи управління проєктами (CI/CD-пайплайни, системи трекінгу завдань, системи контролю версій) [2].

Психологічний рівень базується на використанні практик емоційного інтелекту [7], фасилітації та командної рефлексії. Agile-процеси створюють природні точки інтеграції цього рівня [1]:

– щоденні стендапи — раннє виявлення блокерів;

– планування спринтів — узгодження очікувань;

– ретроспективи — аналіз конфліктного досвіду та покращення процесів.

Особливо важливим цей рівень стає в умовах асинхронної комунікації розподілених команд [8].

Ціннісний рівень спрямований на формування культури довіри, психологічної безпеки та спільної відповідальності [4]. Він реалізується через принципи DevOps-культури [2], зокрема:

– практику blame-free post-mortem;

– прозорість метрик та процесів;

– командні угоди та спільну відповідальність за результат.

Ключова перевага запропонованої моделі полягає в тому, що вона не потребує впровадження окремих процесів, а органічно вбудовується в існуючі ритми роботи команди, як показано в Таблиці 1.

Таблиця 1

**Інтеграція циклічної моделі в Agile/DevOps-процеси**

| Подія / Процес | Рівень моделі | Результат / Практична цінність |
|---|---|---|
| Планування спринту | Алгоритмічний — аналіз даних попередніх спринтів, виявлення ризикових задач | Узгоджені очікування, реалістичне планування, запобігання перевантаженню команди |
| Щоденна нарада | Психологічний — відстеження командного клімату, виявлення перешкод та прихованої напруги | Раннє виявлення проблем, запобігання загостренню, підтримка зосередженості команди |
| Рев'ю коду | Алгоритмічний + Психологічний — аналіз тону коментарів, запобігання гострим висловлюванням | Конструктивний зворотний зв'язок, зменшення технічного боргу, обмін знаннями |

| | | |
|---|---|---|
| Ретроспектива спринту | Психологічний + Ціннісний — фасилітація відвертого діалогу, перетворення конфліктів на завдання для покращення | Безперервне вдосконалення, узгодженість дій команди, культура довіри |
| Розбір інцидентів | Ціннісний — впровадження культури без пошуку винного, зосередження на системних причинах | Навчання на помилках, психологічна безпека, стійкість до збоїв |
| Безперервна інтеграція та доставка | Алгоритмічний — відстеження показників (частота впроваджень, час виконання, швидкість відновлення, частка невдалих змін) | Рішення на основі даних, виявлення відхилень, прогнозування ризиків |

**Інтеграція трьох рівнів** дозволяє сформувати циклічний механізм управління конфліктами, що відповідає ітеративній природі Agile-процесів [1] та технічній інфраструктурі DevOps [2].

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на емпіричну перевірку ефективності моделі в реальних IT-командах.

**Висновки**. У результаті дослідження запропоновано циклічну модель управління конфліктами для розподілених IT-проєктів у середовищі Agile/DevOps, яка реалізує концепцію креативного управління конфліктами на алгоритмічному, психологічному та ціннісному рівнях. Ключовою особливістю є органічна інтеграція в існуючі Agile-ритуали та DevOps-процеси без впровадження окремих управлінських заходів, що перетворює конфлікти з проблеми на ресурс розвитку команди. Подальші дослідження доцільно спрямувати на емпіричну перевірку ефективності моделі в реальних IT-командах.

## Список використаних джерел


1. Agile Alliance. Manifesto for Agile Software Development [Електронний ресурс] / Agile Alliance. — 2001. — Режим доступу: https://agilemanifesto.org
2. Forsgren N. Accelerate: The Science of Lean Software and DevOps / N. Forsgren, J. Humble, G. Kim. — Portland : IT Revolution Press, 2018. — 288 p.
3. Standish Group. CHAOS Report 2023 [Електронний ресурс] / Standish Group. — Boston : The Standish Group International, 2023. — Режим доступу: https://standishgroup.myshopify.com
4. Торба Т. В. Концептуальна модель креативного управління конфліктами в розподілених IT-проєктах [Електронний ресурс] / Т. В. Торба // Наукові праці ВНТУ. — 2025. — № 3. — Режим доступу: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/862/804
5. Leba M. A Fuzzy Logic-Based Risk Assessment Tool for IT Startups / M. Leba, A. Ionica // Innovations in Mechatronics Engineering III. Lecture Notes in Mechanical Engineering. — Springer, Cham, 2024. — DOI: 10.1007/978-3-031-61575-7_22
6. Caputo A. Conflict in virtual teams: a bibliometric analysis, systematic review, and research agenda / A. Caputo, M. Kargina, M. M. Pellegrini // International Journal of Conflict Management. — 2023. — Vol. 34, № 1. — P. 1–31. — DOI: 10.1108/IJCMA-07-2021-0117
7. Goleman D. Optimal Leadership and Emotional Intelligence / D. Goleman, C. Cherniss // Leader to Leader. — 2024. — Vol. 2024. — P. 7–12. — DOI: 10.1002/ltl.20813
8. Торба Т. В. Особливості управління розподіленими IT-проєктами в сучасних умовах / Т. В. Торба, М. В. Гуменюк // Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Черкаси, 2023 р. — Черкаси, 2023. — С. 153–155.

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТНИМИ ТА ОПЕРАЦІЙНИМИ РИЗИКАМИ В ТОРГОВЕЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЯХ

**Денчик О.[1], Меліксетов О.І.[2], Гайдаєнко О.В.[2], Бедрій Д.І.[3,4]**
[1]J. Rettenmaier & Sohne GmbH & Co. KG, Rosenberg, Germany
[2]Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна
[3]Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут радіо і телебачення», Одеса, Україна
[4]Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна

**Анотація.** У роботі проведено дослідження інтегрованого управління проєктними та операційними ризиками в торгівельних організаціях в умовах цифрової трансформації та зростаючої невизначеності. Визначено, що існуючі інформаційні системи не забезпечують комплексного врахування взаємозв'язків між різними типами ризиків, що знижує ефективність управлінських рішень. Запропоновано інформаційну технологію інтегрованого управління ризиками, яка базується на поєднанні моделей «Метелик» та «Сходи», що реалізується у вигляді системи підтримки прийняття рішень. Технологія передбачає інтеграцію даних із корпоративних систем (ERP, CRM), застосування методів аналізу першопричин і факторного аналізу, а також використання засобів візуалізації та бази знань ризиків. Реалізація запропонованого підходу дозволяє підвищити ефективність управління ризиками, оптимізувати розподіл відповідальності, знизити витрати часу та забезпечити адаптивність системи до змін середовища. Результати можуть бути використані при створенні сучасних інформаційних систем управління ризиками.

**Ключові слова**: інформаційні технології, цифрова трансформація, інтегроване управління ризиками, операційні ризики, проєктні ризики, аналіз ризиків, факторний аналіз.

# INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE INTEGRATED MANAGEMENT OF PROJECT AND OPERATIONAL RISKS IN RETAIL ORGANISATIONS

**Denchyk O.[1], Meliksetov O.[2], Haidaienko O.[2], Bedrii D.[3, 4]**
[1]J. Rettenmaier & Sohne GmbH & Co. KG, Rosenberg, Germany
[2]Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine
[3]State Enterprise «Ukrainian Scientific Research Institute Of Radio And Television», Odesa, Ukraine
[4]Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine

**Abstract.** This research examines the integrated management of project and operational risks in trading organisations in the context of digital transformation and growing uncertainty. It has been established that existing information systems do not provide for a comprehensive consideration of the interrelationships between different types of risk, which reduces the effectiveness of management decisions. An information technology for integrated risk management is proposed, based on a combination of the «Butterfly» and «Staircase» models, implemented as a decision support system. The technology involves the integration of data from corporate systems (ERP, CRM), the application of root cause analysis and factor analysis methods, as well as the use of visualisation tools and a risk knowledge base. Implementation of the proposed approach enables improved risk management efficiency, optimised allocation of responsibilities, reduced time expenditure, and ensures the system's adaptability to changes in the environment. The results can be utilised in the development of modern risk management information systems.

**Keywords**: information technology, digital transformation, integrated risk management, operational risks, project risks, risk analysis, factor analysis.

**Вступ.** Сучасні торгівельні організації функціонують в умовах цифрової трансформації, високої динаміки ринку та зростаючої невизначеності, що зумовлює необхідність ефективного управління ризиками [1]. Особливістю їх діяльності є одночасна реалізація проєктних ініціатив та виконання операційних процесів, що формує складну систему взаємопов'язаних ризиків. Існуючі підходи до управління ризиками не

забезпечують належного рівня інтеграції між проєктними та операційними контурами, що знижує ефективність управлінських рішень.

**Мета роботи**. Розробити інформаційну технологію інтегрованого управління проєктними та операційними ризиками в торгівельних організаціях.

**Постановка проблеми**. Основною проблемою є відсутність інформаційних технологій, які забезпечують інтегроване управління проєктними та операційними ризиками з урахуванням їх взаємозв'язків і динамічної природи. У роботі [2] представлено інформаційну технологію інтегрованого протиризикового управління науковими проєктами в умовах невизначеності та переходу до циркулярної економіки, яка спрямована на підтримку керівника проєкту та команди у реалізації комплексної методології управління ризиками з урахуванням інтересів стейкхолдерів. Авторами у роботі [3] висвітлюється питання управління інформаційними ризиками в умовах цифровізації бізнесу, зокрема з урахуванням зростання обсягів даних, кіберзагроз і технічних відмов, що можуть призводити до фінансових втрат і репутаційних ризиків.

Більшість існуючих систем орієнтовані на окремі типи ризиків і не підтримують комплексний аналіз факторів, першопричин і взаємного впливу ризиків, що призводить до дублювання функцій, втрати інформації та зниження ефективності управління ризиками.

**Основна частина**. Запропонована інформаційна технологія ґрунтується на інтеграції моделей «Метелик» [4] та «Сходи» [5], що реалізується у вигляді системи підтримки прийняття рішень (DSS). Технологія передбачає узгодження реєстрів ризиків проєктної та операційної діяльності, їх сепарацію та передачу відповідальності між відповідними підрозділами.

Важливим елементом технології є метод інтегрованого управління проєктними та операційними ризиками в торгівельних організаціях, який забезпечує поетапний аналіз ризиків, включаючи ідентифікацію першопричин, факторний аналіз, виявлення взаємозв'язків між факторами та їх скорочення до найбільш значущих. Це дозволяє формалізувати структуру ризиків та підвищити обґрунтованість управлінських рішень.

Означена інформаційна технологія включає такі основні компоненти (рис. 1):

- модуль збору та обробки даних (ERP/CRM інтеграція);
- аналітичний модуль (факторний аналіз та кластеризація);
- модуль візуалізації (карти ризиків та графи залежностей);
- модуль підтримки прийняття рішень;
- база знань ризиків.

Запропонована архітектура інформаційної технології інтегрованого управління ризиками передбачає багаторівневу обробку даних, починаючи зі збору інформації з внутрішніх (ERP, CRM, проєктні системи) та зовнішніх джерел. На рівні інтеграції формується єдине сховище даних, яке забезпечує узгодженість та повноту інформації про ризики.

Аналітичний рівень реалізує модель «Сходи», що включає аналіз першопричин, факторний аналіз, виявлення взаємозв'язків і кластеризацію ризиків. Паралельно використовується модель «Метелик» для узгодження проєктних і операційних ризиків та уникнення їх дублювання.

Модуль підтримки прийняття рішень (DSS) забезпечує формування оптимальних управлінських впливів на основі результатів аналізу, а візуалізація дозволяє представити результати у вигляді карт ризиків, графів залежностей і дашбордів. Важливим компонентом є база знань, яка акумулює інформацію про ризики та ефективні контрзаходи.

Інтеграція з ERP/BI системами забезпечує автоматизацію процесів управління ризиками, а механізм моніторингу та зворотного зв'язку – адаптивність й безперервне вдосконалення системи.

**Висновки**. Запропонована інформаційна технологія інтегрованого управління ризиками дозволяє підвищити ефективність управління проєктними та операційними ризиками за рахунок їх узгодженого аналізу та використання сучасних аналітичних методів. Використання моделей «Метелик» і «Сходи» забезпечує системний підхід до ідентифікації,

оцінювання та мінімізації ризиків. Практичне застосування технології сприяє зниженню витрат, підвищенню якості управлінських рішень і формуванню адаптивної системи управління ризиками в торговельних організаціях.

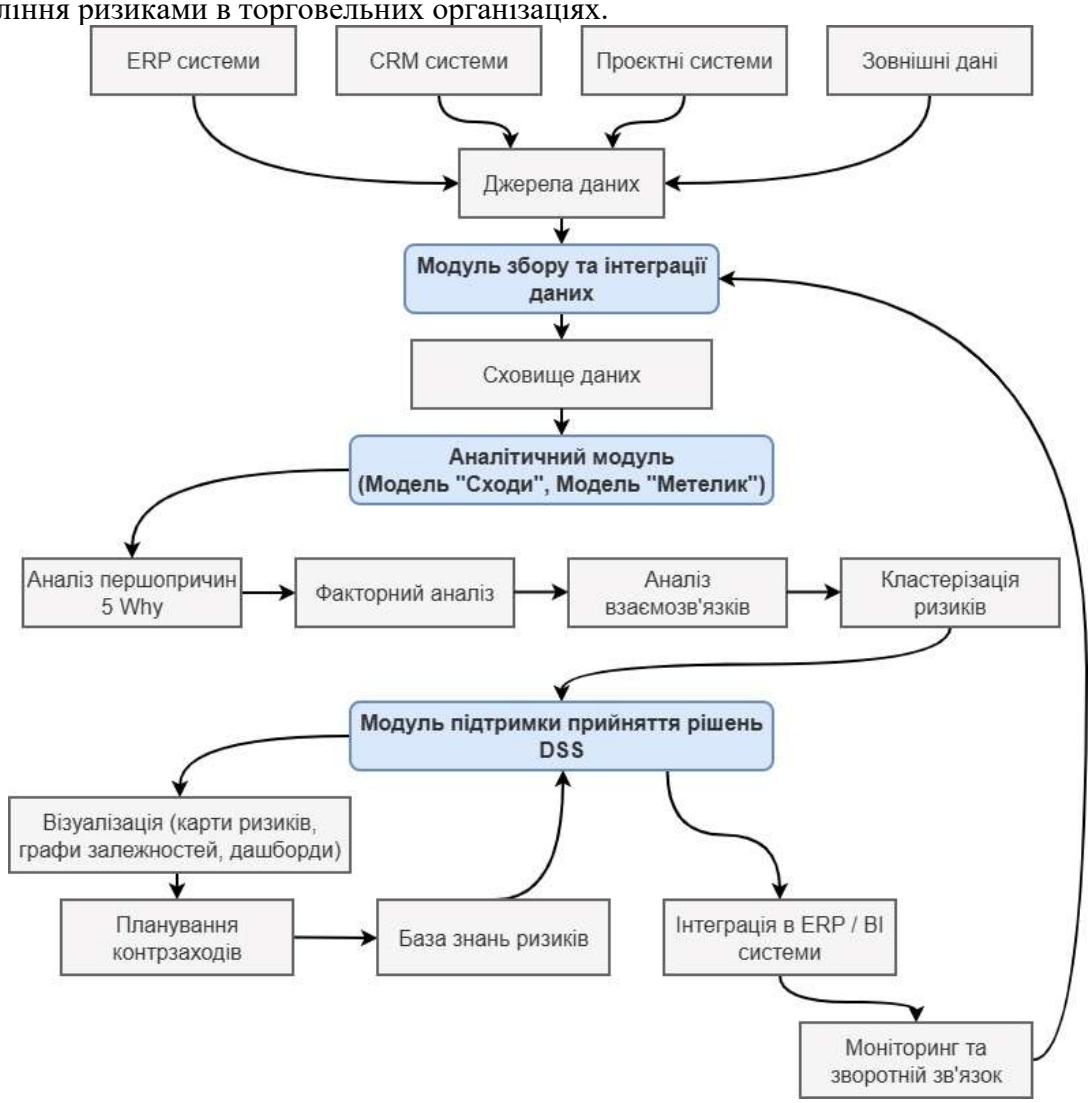



Рис. 1. Архітектура інформаційної технології інтегрованого управління проєктними та операційними ризиками в торгівельній організації

## Список використаних джерел


1. Меліксетов О.І., Гайдаєнко О.В. Теоретико-методичні засади управління ризиками торговельних організацій. *Управління розвитком складних систем*. 2024. Вип. 57. С. 51-61. https://www.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.51-61
2. Бедрій Д.І. Інтегроване протиризикове управління науковими проєктами в умовах невизначеності та переходу до циркулярної економіки: дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.22. Одеса: Державний університет "Одеська політехніка", 2021. 431 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1lZA3hLEwl8VL7K-sxwgjBThAW4S-_zq3/view
3. Лєонов С.В., Семко О.В. Інформаційна технологія управління інформаційними ризиками для проєктів цифрової трансформації бізнесу. *Управління розвитком складних систем*. 2023. Вип. 56. С. 64-69. https://www.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.64-69
4. Меліксетов О.І., Гайдаєнко О.В. Модель інтегрованого управління операційними та проєктними ризиками «Метелик». *Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та програмами*: зб. праць міжнар. наук.-практ. конф. (Харків-Коблево, 9-13 вересня 2024 р.). 2024. С. 152-155. URL: https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/10664
5. Меліксетов О.І., Гайдаєнко О.В. Модель «Сходи» аналізу операційних ризиків компанії з елементами факторного аналізу. *Інформаційні системи та інноваційні технології управління проєктами і програмами*: зб. праць міжнар. наук.-практ. конф. (Харків-Коблево, 15-20 вересня 2025 р.). 2025. С. 194-198. URL: https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/11284

# СПОЖИВЧІ БАР'ЄРИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПРОЦЕСІ ПРИЙНЯТТЯ КУПІВЕЛЬНИХ РІШЕНЬ

**Журило В.В.[1], Біловодська О.А.[1], Блюмська-Данько К.В.[2,3]**
[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна
[3]Університет Париж-Сакле, Со, Франція

**Анотація.** Робота присвячена дослідженню поведінкових бар'єрів взаємодії споживачів із технологіями штучного інтелекту (ШІ) при здійсненні купівельного вибору. Метою роботи є виявлення споживчих бар'єрів використання технологій ШІ у процесі прийняття купівельних рішень, визначення їх видів, змісту, факторів формування, а також оцінювання впливу рівня довіри до ШІ та етичних ризиків на поведінку споживачів. Для цього авторами поставлено завдання: ідентифікувати основні мотиваційні чинники та рівень довіри споживачів до ШІ у процесі прийняття купівельних рішень; визначити та систематизувати споживчі бар'єри, що виникають при взаємодії з технологіями ШІ; обґрунтувати взаємозв'язок між рівнем довіри до ШІ та чутливістю споживачів до етичних ризиків. Об'єктом дослідження є процеси використання технологій ШІ споживачами у процесі прийняття купівельних рішень. Предметом дослідження – споживчі бар'єри використання технологій ШІ при прийнятті купівельних рішень та чинники їх формування. Методи дослідження: узагальнення, анкетування, метод дескриптивної статистики, вибіркове спостереження, системний, факторний та матричний аналіз. За результатами дослідження встановлено, що споживчі бар'єри використання технологій ШІ мають комплексний характер і формуються під впливом функціональних та етичних чинників. Виявлено, що ключовими бар'єрами є когнітивні сумніви щодо достовірності інформації, отримання некоректних рекомендацій, занепокоєння щодо конфіденційності даних, непрозорості алгоритмів та можливого маніпулятивного впливу. Доведено, що високий рівень довіри до ШІ не виключає критичного ставлення споживачів до потенційних ризиків його використання. На основі результатів опитування побудовано матрицю формування споживчих бар'єрів та виокремлено типи споживачів відповідно до соціально-психографічних профілів.

**Ключові слова:** технології штучного інтелекту, поведінка споживачів, споживчі ризики, етичні бар'єри, процес купівлі, модель споживчої поведінки.

# CONSUMER BARRIERS TO THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE PURCHASE DECISION-MAKING PROCESS

**Zhurylo V.,[1] Bilovodska O.[1], Bliumska-Danko K.[2,3]**
[1]Tatras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
[3]Paris-Saclay University, Sceaux, France

**Abstract.** The study is devoted to the investigation of behavioral barriers to consumer interaction with artificial intelligence (AI) technologies in the process of purchase decision-making. The aim of the study is to identify consumer barriers to the use of artificial intelligence technologies in the process of purchase decision-making, to define their types, content, and formation factors, as well as to assess the impact of trust in AI and ethical risks on consumer behaviour. To achieve this aim, the authors set and accomplished the following objectives: 1) to examine consumer motivation in using AI technologies in the purchase decision-making process; 2) to identify and systematize consumer barriers arising in interaction with AI technologies; 3) to substantiate the role of ethical factors in interaction with AI; 4) to establish the relationship between the level of trust in AI and consumers' sensitivity to ethical risks. The object of the study is the processes of using AI technologies by consumers in the purchase decision-making process. The subject of the study is consumer barriers to the use of AI technologies in purchase decision-making and the factors of their formation. Research methods include generalization, survey, systems analysis, factor analysis, and matrix analysis. The results of the study show that consumer barriers to the use of AI technologies are complex in nature and are formed under the influence of functional and ethical factors. It has been found that the key barriers include cognitive doubts regarding the reliability of information, the risk of receiving inaccurate recommendations, concerns about data privacy, algorithmic opacity, and potential manipulative influence. It

has been proven that a high level of trust in AI does not exclude consumers' critical attitude towards potential risks of its use. Based on the survey results, a matrix of consumer barrier formation was developed, and four types of consumers according to socio-psychographic profiles were identified.

**Keywords:** artificial intelligence technologies, consumer behavior, perceived risks, ethical barriers, buying process, behavioral model.

**Вступ.** Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) зумовлює їх активне впровадження не лише в управлінську та операційну діяльність суб'єктів господарювання, а й у процес прийняття купівельних рішень споживачами, трансформуючи традиційні моделі споживчої поведінки. За даними міжнародних досліджень, понад 50% споживачів вже використовують або експериментують із генеративним ШІ у повсякденному житті, зокрема в процесі пошуку товарів, оцінці ринкових альтернатив, отриманні додаткової інформації тощо [1]. Розуміння цих процесів дозволяє глибше оцінити зміни у поведінці споживачів, ідентифікувати ключові бар'єри використання ШІ та визначити фактори, що впливають на рівень довіри до технологій у процесі прийняття купівельних рішень.

**Метою роботи** є виявлення споживчих бар'єрів використання технологій ШІ у процесі прийняття купівельних рішень, визначення їх видів, змісту, факторів формування, а також оцінювання впливу рівня довіри до ШІ та етичних ризиків на поведінку споживачів.

**Постановка завдання.** Відомо, що зростання рівня використання технологій ШІ супроводжується обмеженим рівнем довіри користувачів до них. За даними дослідження споживачів на базі онлайн платформи *Attest*, лише близько 43% споживачів готові довіряти інформації, яку вони отримують завдяки ШІ, тоді як повна довіра характерна для незначної частки споживачів. Крім того, близько 70% користувачів висловлюють занепокоєння щодо конфіденційності та безпеки персональних даних, що підсилює сприйняття ризиків і стримує інтенсивність використання ШІ [2]. За цих умов подальших досліджень потребує визначення споживчих бар'єрів та сприйнятих ризиків використання ШІ, які формуються не лише під впливом функціональних характеристик технології, але й етичних чинників, що визначають рівень прийнятності її застосування у купівельному процесі.

**Основна частина.** З метою визначення ключових мотиваційних установок і споживчих бар'єрів використання ШІ в процесі прийняття купівельних рішень авторами було проведено маркетингове дослідження, у межах якого зібрано первинну маркетингову інформацію. Збір емпіричних даних реалізовано у формі онлайн-опитування (Google Forms), яке охопило респондентів віком від 18 до 57 років, що дало змогу виявити ключові закономірності використання ШІ респондентами, ідентифікувати основні мотивації та ставлення, визначити споживчі бар'єри та соціально-психогафічні профілі користувачів.

Отримані за результатами опитування дані свідчать, що споживчі бар'єри використання ШІ мають комплексний характер та формуються одночасно під впливом функціональних і етичних чинників. Зокрема, до функціональних чинників належать такі, як сумніви щодо достовірності та релевантності інформації, отриманої за допомогою ШІ (середнє значення оцінки – 3,7 балів за 5-ти бальною шкалою), а також ризик отримання некоректних або узагальнених рекомендацій, що не враховують індивідуальні потреби споживача (3,5 балів). Додатково, вагомим бар'єром є занепокоєння респондентів щодо зниження власного рівня критичного мислення внаслідок активного використання ШІ (3,4 балів), що відображає значущість для споживачів когнітивного аспекту взаємодії з технологічними алгоритмами. Етичні бар'єри використання ШІ формуються під впливом таких факторів, як занепокоєння щодо конфіденційності та безпеки персональних даних (близько 3,2 балів), потенційна непрозорість алгоритмів та складність споживачам зрозуміти логіку ухвалення рішень (близько 3 балів), а також усвідомлення ризику маніпулятивного впливу на купівельний вибір (3,4 бали). Зазначені етичні чинники не лише безпосередньо впливають на рівень довіри до ШІ, але й посилюють когнітивні сумніви споживачів щодо надійності інформації, тим самим формуючи більш обережну модель їхньої поведінки.

За результатами опитування нами побудовано матрицю формування споживчих бар'єрів використання ШІ (рис. 1), яка відображає взаємозв'язок між рівнем довіри до технологій ШІ та етичною чутливістю споживачів. Встановлено, що переважна більшість

респондентів (близько 88%) демонструє високий рівень довіри до ШІ, однак майже половина з них одночасно характеризується високим рівнем занепокоєння щодо етичних аспектів його використання. Це свідчить про формування раціональної моделі споживчої поведінки, за якої використання ШІ поєднується з критичним ставленням до його потенційних ризиків. Водночас сегмент споживачів із низьким рівнем довіри є незначним (12% респондентів) та характеризується високим рівнем впливу етичних факторів застосування технологій ШІ.




Рис. 1. Матриця формування споживчих бар'єрів використання ШІ
Джерело: складено авторами за результатами опитування

У межах побудованої матриці виділено чотири групи споживачів залежно від рівня довіри до ШІ та етичної чутливості.

1. *«Прагматично довірливі споживачі»*. Ця група споживачів (45%) характеризується орієнтацією на зручність, швидкість і спрощення процесу прийняття рішень, не надаючи суттєвого значення потенційним етичним ризикам. Їх мотивація базується на прагматичному використанні ШІ як ефективного інструменту, що може призводити до підвищеної схильності беззаперечно приймати рекомендації ШІ.

2. *«Раціонально-критичні споживачі»***.** Споживачі цієї групи (43%) поєднують активне використання ШІ з усвідомленням потенційних етичних ризиків, що формує зважену модель поведінки. Їх мотивація полягає у максимізації користі від технології за умови збереження контролю над прийняттям рішень і критичної оцінки отриманої інформації.

3. *«Скептично налаштовані споживачі»*. Дана група споживачів (3%) характеризується загальною низькою залученістю до використання ШІ, що зумовлено відсутністю як довіри, так і виражених етичних сумнівів. Їх поведінка визначається скоріше низькою зацікавленістю у технології, ніж усвідомленою відмовою від її використання.

4. *«Етично-насторожені споживачі»*. Ці споживачі (9%) демонструють найвищий рівень бар'єрів використання ШІ, що обумовлено значним впливом етичних факторів, зокрема занепокоєнням щодо конфіденційності та маніпулятивного впливу. Їх мотивація пов'язана з уникненням ризиків, що суттєво обмежує використання ШІ при прийнятті купівельних рішень.

**Висновки.** Отримані результати засвідчують, що визначені споживчі бар'єри не спонукають користувачів відмовитись від використання технологій ШІ, а скоріше визначають особливості їх використання у процесі прийняття купівельних рішень. Встановлено, що етичні бар'єри не виступають абсолютним стримуючим фактором, вони модифікують характер поведінки та формують більш обережні, раціональні моделі взаємодії споживачів із ШІ, в рамках яких обмежується делегування прийняття технологіями рішень щодо вирішення купівельних проблем та посилюється критичне осмислення його обмежень. Водночас високий рівень довіри до технологічних алгоритмів не означає, що споживачі не усвідомлюють потенційні ризики від їх використання, їх турбують питання, пов'язані із достовірністю отриманої інформації, конфіденційністю даних та можливістю маніпулятивного впливу.

## Список використаних джерел

1. Deloitte (2025). As Generative AI Gains Ground, Consumers Choose the Innovators They Trust. URL: https://www.deloitte.com/us/en/about/press-room/connectivity-mobile-trends-survey.html?icid=mosaic-grid_deloitte-connected-consumer-survey&utm
2. Booker B. (2025). Consumer Adoption of AI Report. URL: https://www.askattest.com/blog/articles/2025-consumer-adoption-of-ai-report?

# КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСОВИМИ ТА ЛЮДСЬКИМИ РЕСУРСАМИ У ПРОЄКТАХ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**Кавун С.І.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. У роботі пропонується концептуальна модель інформаційної технології адаптивного управління часовими та людськими ресурсами у проєктах розроблення програмного забезпечення. Метою є мінімізація зривів дедлайнів та емоційного вигорання фахівців в умовах Agile-середовища. Розроблено трирівневу архітектуру (шар вхідних даних, ядро обробки на базі графової БД Neo4j та шар адаптивних реакцій), що об'єднує чотири функціональні модулі. Використано методи багатоцільової оптимізації та машинного навчання для автоматизації диспетчеризації завдань і проактивного моніторингу ризиків. Впровадження моделі забезпечує динамічний розподіл навантаження на основі реального профілю компетенцій та поточного стану розробників.

**Ключові слова**: управління проєктами розроблення програмного забезпечення, людські ресурси, часові ресурси, адаптивне планування, проактивний моніторинг, концептуальна модель, інформаційні технології, Scrum.

# CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE TIME AND HUMAN RESOURCE MANAGEMENT IN SOFTWARE DEVELOPMENT PROJECTS

**Kavun S.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The paper proposes a conceptual model of information technology for adaptive time and human resource management in software development projects. The aim is to minimize missed deadlines and professional burnout in Agile environments. A three-layer architecture (input data layer, processing core based on Neo4j graph database, and adaptive response layer) integrating four functional modules has been developed. Methods of multi-objective optimization and machine learning are applied to automate task dispatching and proactive risk monitoring. The implementation of the model provides dynamic workload redistribution based on competency profiles and developers' current states.

**Keywords**: management of software development projects, human resources, time resources, adaptive planning, proactive monitoring, conceptual model, information technology, Scrum.

**Вступ**. Успішна реалізація проєктів розроблення програмного забезпечення критично залежить від управління часом та інтелектуальним капіталом фахівців. Класичні підходи, що спираються на детерміноване планування та статичний розподіл ресурсів, демонструють неспроможність в умовах високої невизначеності методологій Agile та Scrum. Фундаментальна відмінність цієї сфери полягає у стохастичній природі продуктивності: вона не масштабується лінійно, а різниця у швидкості роботи розробників різних рівнів може сягати десятикратних значень [1]. Крім того, залучення додаткових фахівців до проєкту, що відстає від графіку, часто лише сповільнює його через витрати часу на онбординг та комунікаційне навантаження [2]. Це вимагає переходу до адаптивного управління, що інтегрує предиктивну аналітику та враховує поведінкові фактори команди [3].

**Мета роботи**. Розробити концептуальну модель інформаційної технології адаптивного управління часовими та людськими ресурсами розподілених команд розроблення програмного забезпечення для мінімізації впливу поведінкової невизначеності, підвищення точності прогнозування термінів та автоматизації процесів перепланування.

**Постановка задачі**. Існуючі системи управління проєктами (PMIS) оперують статичними метриками доступності персоналу (FTE, «людино-години»), що систематично призводить до «надмірного бронювання» (resource overbooking) розробників [1]. Вони

ігнорують реальні профілі компетенцій фахівців та відірвані від швидких змін життєвого циклу розробки [4]. Відтак виникає необхідність створення комплексної інформаційної технології, яка подолає розрив між статичним плануванням і мінливістю Agile-середовища, об'єднавши управління завданнями з динамічним профілюванням співробітників задля автоматизованої диспетчеризації та проактивного моніторингу ризиків [5].

**Основна частина**. Пропонується концептуальна модель інформаційної технології, що оптимізує управління віддаленими командами розробників, переходячи від статичного планування до динамічного адаптивного управління [2]. Графічне зображення даної концептуальної моделі представлено на Рис.1. Архітектура системи концептуально розділена на три взаємопов'язані шари. Перший – шар вхідних даних та консолідації, який відповідає за акумуляцію зовнішньої інформації з систем відстеження та розробки. Другий – ядро обробки даних, центральним елементом якого є графова база даних (Neo4j), що ідеально підходить для миттєвого відстеження та обробки складних багатовимірних зв'язків між співробітниками, їхніми компетенціями (Skills Matrix) та проєктними завданнями [5]. Третій – шар адаптивних реакцій та моніторингу, який відповідає за відстеження поточного стану та ініціювання автоматизованих управлінських дій.

У межах цих трьох шарів функціонують чотири інтегровані модулі:

1. Модуль планування: працює у шарі вхідних даних та консолідації. Він збирає контекстну інформацію через API безпосередньо з робочих середовищ (Jira для управління завданнями, GitLab для коду) та формує єдине структуроване бачення пулу робіт [5].

2. Модуль диспетчеризації (логіка обробки): функціонує в ядрі обробки даних у тісній взаємодії з графовою БД. Він здійснює автоматизований багатовимірний розподіл завдань. Замість показника FTE система оцінює цифровий профіль розробника: його реальні навички, історичну швидкість роботи (Velocity) та поточний стан. При виникненні термінового багу система знаходить фахівця з необхідними компетенціями, мінімізуючи ланцюговий зсув інших дедлайнів [1].

3. Модуль предиктивної аналітики: також є складовою ядра обробки даних, працюючи у тандемі з диспетчеризацією. Він застосовує машинне навчання для прогнозування реалістичних термінів. Алгоритми коригують суб'єктивні експертні оцінки розробників на основі їхньої історичної продуктивності, виконуючи функцію дебіасингу (усунення когнітивних ухилів) [3].

4. Модуль проактивного моніторингу: складає основу шару адаптивних реакцій та моніторингу. Він безперервно відстежує метрики Scrum. Наприклад, якщо завдання «зависає» або графік згоряння (Burn-down) відхиляється від норми, модуль через систему тригерів (Triggers) ініціює автоматичне перепризначення завдань і миттєво надсилає інформацію у систему сповіщень [6].




Рис. 1. Концептуальна модель інформаційної технології управління ресурсами у проєктах розроблення програмного забезпечення

Використання подібної омніканальної інформаційної технології дозволяє збирати телеметрію з різних точок дотику [1], формуючи цілісний та безперервний досвід взаємодії співробітників із процесами проєкту.

**Висновок**. Запропонована концептуальна модель інформаційної технології адаптивного управління формує принципово нову парадигму адміністрування проєктів розроблення програмного забезпечення. Перехід від жорсткого управління завданнями до багатокритеріального управління динамічними профілями компетенцій, збагаченого проактивним моніторингом ризиків на основі артефактів Scrum, дозволяє нівелювати вплив поведінкової невизначеності та нелінійної продуктивності команд. Використання графової бази даних (зокрема Neo4j) та алгоритмів оптимізації забезпечує можливість миттєвого перепланування ресурсів при раптових змінах середовища, мінімізуючи простої та знижуючи ризики емоційного вигорання фахівців. Практичне впровадження розробленої моделі сприятиме раціоналізації використання людського капіталу і суттєво підвищить рівень успішної та своєчасної реалізації проєктів розроблення програмного забезпечення.

## Список використаних джерел


1. Кавун, С. (2025). Інструменти управління часовими та людськими ресурсами в проєктах розробки програмного забезпечення. Zenodo, с. 88–91. URL: https://zenodo.org/records/18428325.
2. Ільчук, П. Г., Горейко, Д. Я. (2025). Моделі управління віддаленими IT-командами: систематичний огляд та концептуальна модель. *Економіка та суспільство*, (74). DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-122.
3. Koptieva, H. (2024). Управління невизначеністю IT-проєктів: адаптивна модель із інтеграцією поведінкових факторів. *Економіка та суспільство*, (74). URL: https://eco-science.net/wp-content/uploads/2025/08/8.25._topic_Hanna-Koptieva-268-279.pdf.
4. Ottaviani, F. M. (2025). Project Management Information Systems: a Systematic Review. *Procedia Computer Science*, 256, 1739–1747. URL: https://www.researchgate.net/publication/389738684_Project_Management_Information_Systems_a_Systematic_Review.
5. Тищенко Д., Антипенко В. (2025). Концептуальна модель структури інформаційної технології організації автоматизованого виконання проєктувальних робіт в IT-проєктах. Таврійський науковий вісник №2. Серія: Технічні науки. 207-215. URL: https://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/885/817.
6. Bisikirskienė, L., Čeponienė, L., Vilutis, G., & Nečionytė, A. (2025). Software Project Risk Identification Based on Scrum Artifacts. Applied Sciences, 15(2), 824. https://doi.org/10.3390/app15020824.

# СИНТЕЗ АНАЛІТИЧНОГО ЯДРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ «СЛАБКИХ СИГНАЛІВ» ПРОЄКТІВ ЕКСПОРТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

**Kolmykova A.[1], Мазуренко М.[2], Миронець І.[2], Тесленко П.[3], Коваленко А.[4]**
[1]FOM Hochschule, Bremen, Federal Republic of Germany,
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна,
[3]Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна,
[4]Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

**Анотація.** У роботі досліджено підхід до синтезу аналітичного ядра інформаційної системи виявлення слабких сигналів у проєктах експортної діяльності. Запропоновано інтеграцію методів обробки природної мови, машинного навчання та інтелектуальної підтримки прийняття рішень для раннього виявлення потенційних ризиків у потоках неструктурованих і структурованих даних. Розроблена модель забезпечує виявлення аномалій, тематичний аналіз, оцінку ризиків та прогнозування їх впливу на строки і бюджет проєктів. Використання прогнозних та оптимізаційних алгоритмів дозволяє підвищити точність управлінських рішень і забезпечити адаптивність системи до змін зовнішнього середовища.

**Ключові слова:** слабкі сигнали, експортна діяльність, інформаційна система, інтелектуальний аналіз даних, машинне навчання, NLP, управління ризиками, прогнозування.

# SYNTHESIS OF THE ANALYTICAL CORE OF THE INFORMATION SYSTEM FOR DETECTION OF “WEAK SIGNALS” OF EXPORT ACTIVITY PROJECTS

**Kolmykova A.[1], Mazurenko M.[2], Myronets I.[2], Teslenko P.[3], Kovalenko A.[4]**
[1]FOM Hochschule, Bremen, Federal Republic of Germany,
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine,
[3]Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine,
[4]Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

**Abstract.** The paper investigates an approach to the synthesis of the analytical core of the information system for detecting weak signals in export activity projects. The integration of natural language processing methods, machine learning, and intelligent decision support for the early detection of potential risks in both unstructured and structured data flows is proposed. The developed model provides for the detection of anomalies, thematic analysis, risk assessment and forecasting of their impact on the timing and budget of projects. The use of predictive and optimization algorithms allows to increase the accuracy of management decisions and ensure the adaptability of the system to changes in the external environment.

**Keywords:** weak signals, export activity, information system, data mining, machine learning, NLP, risk management, forecasting.

**Вступ.** Висока динаміка міжнародних ринків вимагає ефективного управління проєктами експортної діяльності задля своєчасного виявлення ранніх ознак змін у зовнішньому середовищі [1]. Такі зміни часто проявляються у вигляді «слабких сигналів», які мають фрагментарний, неявний характер і можуть бути непомітними в умовах інформаційного шуму. Ігнорування цих сигналів призводить до запізнілого реагування на регуляторні, економічні або політичні трансформації, що підвищує ризики зриву контрактів, втрати ринків збуту та фінансових збитків. Водночас своєчасна ідентифікація слабких сигналів дозволяє перейти до проактивного управління, забезпечити адаптацію експортних стратегій і підвищити стійкість проєктів до зовнішніх збурень, що обумовлює актуальність розробки інтелектуальних інформаційних систем їх виявлення.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка аналітичного ядра ІС з виявлення слабких сигналів щодо змін зовнішнього оточення на ринках постачання продукції та послуг в проєктах експортної діяльності.

**Постановка проблеми.** Управління проєктами експортної діяльності відбувається в умовах високої невизначеності, зумовленої динамікою зовнішнього середовища,

регуляторними змінами та нестабільністю міжнародних ринків. Традиційні підходи орієнтовані на реагування на вже сформовані події, що знижує їх ефективність і призводить до втрат часу та ресурсів. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування засобів та прикладних інструментів ІТ, а саме ІАД до виявлення «слабких сигналів» як ранніх індикаторів потенційних змін, що дозволяє здійснювати проактивне управління проєктами та мінімізувати ризики ще на етапі їх зародження [2].

**Основна частина.** Синтез аналітичного ядра ІС виявлення «слабких сигналів» проєктів експортної діяльності доцільно виконувати як інтеграцію NLP, класичного машинного навчання та інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Такий підхід відповідає сучасній логіці data-driven risk management, де аналітика, AI та ML застосовуються для раннього виявлення ризиків у міжнародній торгівлі та ланцюгах постачання [3], а слабкі сигнали розглядаються як малі відхилення, що можуть попереджати про майбутні розриви або кризи [4].

На вході ядра формується потік даних

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\},$$

де $d_i$ – повідомлення з митних бюлетенів, новин, регуляторних сайтів, тендерних баз, соцмереж, галузевих звітів або внутрішніх документів експортного проєкту.

Після очищення, токенізації та векторизації текст перетворюється у матрицю ознак

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

де $x_i$ – числовий вектор документа.

Перший блок ядра призначений для виявлення слабких сигналів. Для пошуку аномалій у потоці подій використовується Isolation Forest, де аномальність об’єкта визначається коротким шляхом ізоляції:

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}}.$$

Тут $s(x, n)$ – оцінка аномальності запису $x$,

$E(h(x))$ – середня довжина шляху ізоляції,

$c(n)$ – нормалізуючий коефіцієнт для вибірки розміру $n$.

На вході подається матриця ознак $X$, а на виході формується множина підозрілих подій

$$A = \{a_j \mid s(a_j) > \tau\},$$

де $\tau$ – поріг ризику.

One-Class SVM може доповнювати цей блок через функцію рішення

$$f(x) = \text{sign}(w \cdot \phi(x) - \rho),$$

де $w$ – вектор ваг, $\phi(x)$ – перетворення ознак у простір ядра, $\rho$ – межа нормальної області.

Виходом є позначка: нормальний запис або потенційний слабкий сигнал.

Для аналізу прихованих тем застосовується LDA або BERTopic. У LDA документ описується як суміш тем:

$$P(w \mid d) = \sum_{k=1}^{K} P(w \mid z_k) P(z_k \mid d),$$

де $w$ – слово, $d$ – документ, $z_k$ – тема, $K$ – кількість тем.

На вході – корпус текстів, на виході – набір тем $Z$і ймовірність належності документа до теми. Це дозволяє виявити зародження нових регуляторних трендів. Для тональності використовується модель

$$y = softmax(Wx + b),$$

де $x$ – вектор тексту, $W$ – матриця ваг, $b$ – зсув, $y$ – ймовірності класів тональності.

Якщо тональність повідомлень регулятора щодо імпорту переходить від нейтральної до негативної, система підвищує рівень ризику. Knowledge Graphs описуються як $G = (V, E, R)$, де $V$– сутності, $E$– зв’язки, $R$– типи відношень. Вони потрібні для пояснення сигналів, наприклад зв’язку між політичним рішенням, митними правилами та ризиком затримки поставок.

Другий блок виконує класифікацію та оцінку сигналів за типами експортних проєктів. Для адаптації виробництва використовується Case-Based Reasoning, де схожість нового випадку з історичним визначається як

$$Sim(q,c) = \frac{\sum_i w_i sim(q_i,c_i)}{\sum_i w_i},$$

де $q$ – новий проєкт, $c$ – минулий кейс, $w_i$ – вага ознаки, $sim(q_i, c_i)$ – локальна схожість.

Вхід – опис нового проєкту та база кейсів, вихід – найближчі кейси й очікуваний ризик. Нечітка логіка застосовується, коли вимоги нечіткі: $\mu_A(x) \in [0,1]$, де $\mu_A(x)$– ступінь належності параметра до класу, наприклад «високий ризик невідповідності». Для дослідження ринку застосовуються байєсівські мережі:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i \mid Pa(X_i)),$$

де $Pa(X_i)$ – батьківські змінні.

Вони оцінюють достовірність прогнозу попиту за неповних даних. Ensemble Learning, наприклад Random Forest або XGBoost, агрегує прогнози: $\hat{y} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} f_m(x)$, де $f_m(x)$ – окрема модель, $M$ – кількість моделей. Для моніторингових проєктів використовується динамічний скоринг:

$$R_t = \sigma(\beta_0 + \sum_i \beta_i x_{it}),$$

де $R_t$ – рейтинг безпеки ринку в момент $t$, $x_{it}$ – поточні фактори, $\sigma$ – логістична функція.

Третій блок переводить якісні сигнали у прогноз впливу на строки й бюджет. Для часових рядів використовується LSTM, де стан оновлюється через $h_t = LSTM(x_t, h_{t-1})$, а прогноз має вигляд $\hat{T} = g(h_t)$. Тут $x_t$– подія у момент часу, $h_t$– прихований стан, $\hat{T}$– прогноз затримки.

Monte Carlo Simulation моделює бюджетний ризик:

$$P(C > B) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I(C_i > B),$$

де $C_i$ – змодельована вартість у сценарії $i$, $B$ – бюджет, $I$ – індикатор перевищення.

Gradient Boosting прогнозує втрати:

$$\hat{y} = \sum_{m=1}^{M} \eta f_m(x),$$

де $\eta$ – швидкість навчання, $f_m(x)$ – дерево рішень, $x$ – фактори ризику.

Завершальний синтез ядра виконується через пошук критичних комбінацій подій. Association Rule Learning формує правила

$$A \Rightarrow B$$

з показниками

$$support(A \Rightarrow B) = \frac{|A \cup B|}{N} \text{ та } confidence(A \Rightarrow B) = \frac{|A \cup B|}{|A|}.$$

Правило «зміна еко-стандарту + затримка логістики ⇒ точка відмови» має високі support і confidence, система передає його у модуль прийняття рішень. Отримані результати використовуються для ранжування ризиків, запуску попереджувальних сценаріїв, зміни плану експортного проєкту та формування рекомендацій менеджеру. На цьому синтез аналітичного ядра виявлення слабких сигналів завершено.

**Висновки.** Розроблений підхід до синтезу аналітичного ядра ІС забезпечує перехід до проактивного управління експортними проєктами на основі інтеграції методів NLP, машинного навчання та інтелектуального аналізу даних. Використання моделей виявлення аномалій, тематичного моделювання, байєсівських мереж і ансамблевих алгоритмів дозволяє формалізувати процес ідентифікації слабких сигналів та їх трансформації у кількісні оцінки ризиків. Запропонована архітектура забезпечує побудову замкненого контуру прийняття рішень із використанням прогнозних моделей і механізмів зворотного зв'язку, що підвищує адаптивність, точність оцінювання ризиків та стійкість експортних проєктів до зовнішніх збурень.

## Список використаних джерел


1. Коваленко А., Мазуренко М. (2024). Аналіз зовнішнього оточення проєктів експортної діяльності. *Управління розвитком складних систем*, (58), 25–32. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.58.25-32.
2. Тесленко П. О., Ворона /М. В. (2024). Штучний інтелект в прогнозуванні попиту в ритейлі = Artificial intelligence in forecasting demand in retail. Матеріали V всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф. "Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи" (ITMAS–2024). Миколаїв : НУК, 221–223. URL : https://itconf.nuos.edu.ua/2024/proceedings/
3. Vijayakumar S. (2025). Technology-centric and Data-Driven Customs Risk Management for Supply Chain Security. *World Customs Journal*, 19 (1), 38–63. https://doi.org/10.55596/001c.131745.
4. Georgiadis D., Raubal M. (2020). An interdisciplinary review on weak signal detection Future Resilient Systems Working Paper #3. Working Paper. *ETH Zurich Research Collection*. 35. https://doi.org/10.3929/ethz-b-000461671.

# ПЕРЕВАГИ МЕТОДОЛОГІЇ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ

**Коляда А.Ю.**
Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі розглядаються особливості управління ризиками в інфраструктурних проєктах повоєнного відновлення України та обґрунтовується доцільність застосування методології системного аналізу для підвищення ефективності їх реалізації. Метою дослідження є визначення переваг використання методів системного аналізу в умовах високої невизначеності та складності проєктного середовища. Об'єктом дослідження є процес управління інфраструктурними проєктами повоєнного відновлення, предметом – застосування методів системного аналізу для управління ризиками. У роботі використано методи системного аналізу, моделювання складних систем, аналізу ризиків та причинно-наслідкових зв'язків. Результати дослідження демонструють, що системний підхід дозволяє враховувати взаємозалежності між елементами проєкту, прогнозувати ризики та підвищувати ефективність прийняття управлінських рішень.

**Ключові слова:** системний аналіз, управління ризиками, інфраструктурні проєкти, повоєнне відновлення, проєктний менеджмент.

# ADVANTAGES OF SYSTEMS ANALYSIS METHODOLOGY IN PROJECT MANAGEMENT OF POST-WAR RECONSTRUCTION

**Koliada A.**
State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper examines the specifics of risk management in infrastructure projects of Ukraine's post-war reconstruction and substantiates the feasibility of applying systems analysis methodology to improve their effectiveness. The aim of the study is to identify the advantages of using systems analysis methods in conditions of high uncertainty and complexity of the project environment. The object of the study is the process of managing infrastructure reconstruction projects, while the subject is the application of systems analysis methods for risk management. The study employs systems analysis methods, complex system modeling, risk analysis, and causal relationship analysis. The results demonstrate that a systems approach enables consideration of interdependencies between project components, improves risk forecasting, and enhances decision-making efficiency.

**Keywords:** systems analysis, risk management, infrastructure projects, post-war reconstruction, project management.

**Вступ.** Реалізація інфраструктурних проєктів повоєнного відновлення України буде стикатися з різними проблемами та небезпеками, такими як труднощі з нестабільною безпековою ситуацією, залежність від міжнародної підтримки, зміни державної політики, валютні коливання, перевищення кошторисів, неефективне управління бюджетними ресурсами, низький рівень проєктного менеджменту, невідповідність стандартам екологічності. У процесі реалізації інфраструктурних проєктів доводиться змінювати проєктні плани в залежності від нових обставин.

Інфраструктурні проєкти стикаються з безліччю проблем, включаючи як економічні, так і екологічні. 90% інфраструктурних проєктів обходяться дорожче, ніж очікувалося, в середньому на 28%. Затримка завершення проєкту з фінансових причин може скоротити термін служби проєкту та збільшити витрати на його обслуговування. Якщо не вирішити ризикові ситуації раніше виявленої проблеми, проєкт може перейти з короткострокового до довгострокового. Ризик визначають як потенційну можливість настання небажаної події, тому важливо мати здатність виявляти та розуміти всі ризики, з якими стикаються у процесі реалізації інфраструктурних проєктів.

**Мета роботи.** Метою роботи є визначення переваг застосування методів системного аналізу для управління ризиками в інфраструктурних проєктах повоєнного відновлення в умовах високої невизначеності та складності проєктного середовища.

**Постановка задачі.** Стратегії управління ризиками (УР) допомагають підвищити цінність та якість проєкту, дотримуватися термінів та знизити його вартість. Основна мета УР – усунення невизначеності результатів, пов'язаних із інфраструктурним проєктом [3]. Непередбачуваність – це ризик у кожному проєкті, але він особливо важливий у будівельному секторі через складність галузі, що постійно змінюється. Через свою складність і тривалість великі державні будівельні проєкти мають вищий рівень ризику, ніж менші аналоги, що робить їх складнішими для прогнозування [1]. Ефективний підхід до управління ризиками повинен починатися з виявлення ризиків та подальшого аналізу цих ризиків, перш ніж їх можна буде усунути.

Виявлення та розуміння конкретних механізмів, за допомогою яких стратегія управління ризиками впливає на результати реалізації проєкту, є складним завданням, оскільки реалізація відбувається в контексті складних багаторівневих систем. Ці системи та механізми на кожному рівні мають своє власне динамічне середовище, яке часто змінюється. Наприклад, послідовність дій може мати значення, оскільки механізм може бути активований лише опосередковано стратегією через інший механізм. Дозування або сила механізму можуть змінюватися згодом чи різних рівнях системи будівельної галузі.

Розробка надійної та ефективної стратегії управління ризиками може бути складним завданням для складних проєктів. Такі проєкти можуть мати тривалий та складний життєвий цикл, безліч зацікавлених сторін, складну організаційну структуру та складні договірні умови. Для таких проєктів виявлення та оцінка ризиків – непросте завдання, що залежить від характеристик проєкту та умов навколишнього середовища, а також від недостатнього зворотного зв'язку за аналогічними ризиками.

Крім того, спостерігається прогалина у застосуванні методів управління ризиками на практиці. Наприклад, у сфері будівельних проєктів управління ризиками недооцінюється, оскільки керівники проєктів не завжди мають достатньо часу, щоб приділяти йому увагу. Однак втрати для компаній можуть бути дуже серйозними, якщо через відсутність аналізу ризиків було прийнято неправильне стратегічне рішення, особливо на етапі укладання контракту.

**Основна частина**. Для виявлення механізмів, що стосуються успішної реалізації інфраструктурних проєктів в умовах такої складності, необхідні методи системного аналізу для моделювання та управління складністю.

Області системної інженерії та системної науки пропонують методи, які ми називаємо методами системного аналізу, що допомагають пояснити взаємозалежні відносини між системами і всередині них, а також динамічні зміни систем у часі.

Методи системного аналізу також дозволяють моделювати тенденції, що спостерігаються і очікувані з урахуванням динамічної складності системи (наприклад, виникаючі явища, структурні зміни, що є результатом реалізації проєкту, петлі зворотного зв'язку, представлені змінами, які є результатом ендогенних змін усередині системи [2]). Крім того, моделювання може бути відкаліброване з використанням історичних даних для підвищення впевненості в результатах моделювання для періодів часу, що не спостерігаються (тобто майбутнього). Потім ці симуляції можуть бути використані для проведення експериментів з вивчення таких питань, як очікувані системні ефекти від реалізації інфраструктурного проєкту з урахуванням контекстних факторів (наприклад, розмір будівлі, структура зацікавлених сторін), тимчасові точки, де очікуються зміни певної величини (для декількох змінних уздовж передбачуваного причинно-наслідкового шляху, включаючи ті, які, як те, хто найбільше виграє від цього підходу до реалізації).

Під час планування інфраструктурного проєкту методи системного аналізу дозволяють глибше зрозуміти різні чинники, які впливають на успіх чи невдачу проєкту. Розглядаючи проєкт у цілому, а не зосереджуючись на окремих компонентах, системний

аналіз допомагає виявити приховані залежності, визначити критичні шляхи та передбачати потенційні перешкоди.

Системний підхід системного аналізу допомагає визначити межі та масштаб проєкту. Ретельно вивчивши цілі інфраструктурного проєкту, зацікавлених сторін та обмеження, методи системного аналізу забезпечують всебічний та комплексний процес планування. Системний аналіз дозволяє керівникам проєктів виявляти потенційні ризики та передбачати проблеми, які можуть виникнути протягом життєвого циклу проєкту. Ці ризики можна проаналізувати і пом'якшити на етапі планування, знижуючи ймовірність несподіваних перешкод, які можуть зірвати проєкт надалі.

Розуміння взаємозалежностей та вимог різних компонентів проєкту допомагає керівникам проєктів ефективно розподіляти ресурси. Це гарантує наявність усіх необхідних ресурсів у потрібний час, мінімізуючи вузькі місця та максимізуючи ефективність.

**Висновок.** У ході проведеного дослідження проаналізовано особливості управління ризиками в інфраструктурних проєктах повоєнного відновлення та обґрунтовано доцільність застосування методів системного аналізу для підвищення ефективності їх реалізації. Встановлено, що складність та динамічність проєктного середовища зумовлюють необхідність урахування взаємозалежностей між елементами системи та багаторівневих механізмів впливу ризиків на результати проєкту. Показано, що використання методів системного аналізу дозволяє здійснювати моделювання складних процесів, прогнозування ризиків та обґрунтоване прийняття управлінських рішень з урахуванням змін у зовнішньому та внутрішньому середовищі проєкту.

## Список використаних джерел


1. Kim B., Cruden G., Crable E. L. A structured approach to applying systems analysis methods for examining implementation mechanisms // Implement Sci Commun. 2023. Vol. 4. Article 127. DOI: https://doi.org/10.1186/s43058-023-00504-5
2. Masengesho E., Wei J., Umubyeyi N., Niyirora R. A review on the role of risk management and value engineering tools for project successful delivery // World Journal of Engineering and Technology. 2021. Vol. 9, No. 1. DOI: https://doi.org/10.4236/wjet.2021.91009.
3. Tserng H., Cho I., Chen C., Liu Y. Developing a risk management process for infrastructure projects using IDEF0 // Sustainability. 2021. Vol. 13, No. 12. Article 6958. URL: https://www.scopus.com/pages/publications/85108738958.

# ІНФОРМАЦІЙНА СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ФОРМУВАННЯ BACKLOG IT-ПРОЄКТІВ

**Kondrashov O.[1], Мартиненко М.[2], Бондар О.[2], Баришнікова В.[3], Фонар Л.[2]**
[1]Thompson Rivers University, Kamloops, Canada
[2]Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна
[3]Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

**Анотація.** Досліджено інформаційну структуру автоматизованого контролю формування backlog у IT-проєктах з використанням методів інтелектуального аналізу даних і штучного інтелекту. Розглянуто процес трансформації текстових ініціатив у формалізовані задачі на основі NLP-моделей та методів вилучення знань. Запропоновано підхід до первинної фільтрації задач із застосуванням семантичної відповідності та класифікаційних моделей для контролю меж змісту. Обґрунтовано використання прогнозних моделей для оцінювання впливу змін на часові, вартісні та ризикові параметри проєкту. Визначено взаємозв'язок моделей у єдиній системі прийняття рішень, що дозволяє зменшити неконтрольоване розширення змісту та підвищити ймовірність успішного завершення IT-проєкту.

**Ключові слова**: IT-проєкти, backlog, scope creep, інтелектуальний аналіз даних, штучний інтелект, NLP, прогнозування, управління ризиками.

# INFORMATION STRUCTURE FOR THE AUTOMATED MONITORING OF THE BACKLOG FORMATION IN IT PROJECTS

**Kondrashov O.[1], Martynenko M.[2], Bondar O.[2], Baryshnikova V.[3], Fonar L.[2]**
[1]Thompson Rivers University, Kamloops, Canada
[2]Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
[3]Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

**Abstract.** This study examines the information structure of automated backlog management in IT projects using methods of intelligent data analysis and artificial intelligence. It explores the process of transforming textual initiatives into formalised tasks based on NLP models and knowledge extraction methods. An approach to the initial filtering of tasks is proposed, utilising semantic matching and classification models to control content boundaries. The use of predictive models to assess the impact of changes on a project's time, cost and risk parameters is justified. The interrelationship of models within a unified decision-making system is identified, which helps to reduce uncontrolled scope creep and increase the likelihood of successful completion of an IT project.

**Keywords**: IT projects, backlog, scope creep, intelligent data analysis, artificial intelligence, NLP, forecasting, risk management.

**Вступ.** У сучасних IT-проєктах процес формування backlog визначає не лише послідовність робіт, а й загальну стійкість проєкту до змін. Висока динаміка вимог, складність програмних систем та активна взаємодія зі стейкхолдерами створюють умови для неконтрольованого розширення змісту [1, 2]. Це обумовлює потребу переходу від інтуїтивного управління задачами до формалізованих підходів на основі інтелектуального аналізу даних (ІАД) та систем штучного інтелекту. Побудова інформаційної структури автоматизованого контролю дозволяє забезпечити узгодженість рішень і зменшити ризики перевищення ресурсних обмежень.

**Мета роботи**. Розробити інформаційну структуру автоматизованого контролю IT-проєктів.

**Постановка проблеми**. Неконтрольоване розширення змісту є однією з основних причин неуспішності IT-проєктів, оскільки призводить до перевищення термінів, бюджету та зниження якості результатів [1, 2]. У традиційних підходах управління backlog відсутні механізми формалізованого контролю змін, що унеможливлює своєчасне виявлення ризиків. крім того, особливого значення набуває розробка методів, які поєднують математичне

моделювання, аналіз даних та інтелектуальні системи для підтримки управлінських рішень. Розгляд scope creep як наукової проблеми дозволяє перейти від описового аналізу до побудови формальних моделей, здатних прогнозувати вплив змін та забезпечувати керованість складних IT-систем.

**Основна частина**. Неконтрольоване розширення змісту IT-проєктів (scope creep) – це процес поступового або стрибкоподібного збільшення обсягу робіт без відповідного перегляду ресурсів, термінів та цілей. Воно виникає тоді, коли нові вимоги, функції або зміни додаються до backlog без належної формалізації, оцінювання та контролю. У результаті початково визначений зміст проєкту втрачає стабільність, а межі продукту стають розмитими. Для IT-проєктів це явище є особливо характерним через нематеріальність продукту, складність систем та високу залежність від змін зовнішнього середовища [3, 4].

З огляду на це виникає необхідність розробки інформаційної структури автоматизованого контролю формування backlog. Така структура базується на використанні методів інтелектуального аналізу даних і штучного інтелекту для формалізації, фільтрації та оцінювання задач. Вона забезпечує перехід від інтуїтивного управління до системного прийняття рішень, де кожна зміна аналізується з точки зору її впливу на проєкт. Це дозволяє обмежити неконтрольоване розширення змісту, підвищити прозорість процесів і забезпечити досягнення стратегічних цілей IT-проєкту.

Інформаційна структура автоматизованого контролю формування backlog ґрунтується на припущенні, що неконтрольоване розширення змісту IT-проєкту виникає через неструктуровані запити, слабку перевірку відповідності змісту та відсутність кількісної оцінки впливу змін. Для усунення цих причин застосовується інтегрований підхід інтелектуального аналізу даних та штучного інтелекту, який послідовно перетворює текстові ініціативи у формалізовані рішення.

На етапі ініціювання задачі використовується NLP-модель, що відображає текст запиту $X_i$ у вектор ознак за формулою (1):

$$E_i = \phi(X_i), \tag{1}$$

де $\phi$ – функція кодування (embedding);
$E_i$ – семантичне представлення.
Далі класифікатор визначає тип задачі відповідно до формули (2):

$$T_i = \text{argmax}_k \, P\,(k|E_i), \tag{2}$$

де $P(k|E_i)$ – ймовірність належності до класу $k$ (feature, bug, change).
Одночасно модель регресії оцінює складність відповідно до (3):

$$\hat{C}_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{m} \beta_j x_{ij}, \tag{3}$$

де $\beta_j$ – вагові коефіцієнти;
$x_{ij}$ – ознаки задачі.
На етапі первинної фільтрації застосовується семантична відповідність згідно формули (4):

$$Sim_i = \frac{E_i}{\|E_i\|\|S\|}, \tag{4}$$

де $S$ – вектор затвердженого змісту:
$Sim_i$ – ступінь відповідності.
Далі використовується класифікатор (5):

$$Y_i = f(E_i, Sim_i), \tag{5}$$

де $Y_i \in \{0,1\}$ – рішення про включення у scope. Це дозволяє відсіювати задачі, що спричиняють розширення змісту.

Оцінювання впливу виконується через прогнозні моделі. Часова зміна визначається як (6):

$$\Delta\hat{T}_i = g_1(E_i, C_i), \tag{6}$$

а вартісна (7):

$$\Delta\hat{C}_i = g_2\left(\Delta\hat{T}_i, r\right), \tag{7}$$

де $r$ – ставка ресурсів.

Складність (8) залежить від графа залежностей $G_i$:

$$\Delta\hat{S}_i = g_3(G_i), \tag{8}$$

а ризик (9):

$$\Delta\hat{R}_i = g_4(E_i, H), \tag{9}$$

де $H$ – історичні дані.

Інтегральний вплив визначається як (10):

$$Impact_i = w_1\Delta\hat{T}_i + w_2\Delta\hat{C}_i + w_3\Delta\hat{S}_i + w_4\Delta\hat{R}_i, \tag{10}$$

де $w_k$ – ваги критеріїв.

Таким чином, взаємозв'язок моделей забезпечує перехід від текстових змін до кількісної оцінки їх впливу. Значення $Impact_i$ відображає, як кожна нова задача змінює параметри проєкту та впливає на ймовірність його успішного завершення, що дозволяє обмежувати неконтрольоване розширення змісту.

**Висновки**. Запропонований підхід до автоматизованого контролю формування backlog забезпечує інтеграцію методів інтелектуального аналізу даних та штучного інтелекту на всіх етапах обробки задач. Використання NLP дозволяє формалізувати вхідні запити, класифікаційні моделі – контролювати межі змісту, а прогнозні моделі – оцінювати вплив змін на параметри проєкту. Така взаємодія формує єдину інформаційну систему прийняття рішень, що сприяє зниженню ризику неконтрольованого розширення змісту. Отримані результати підтверджують доцільність використання інтелектуальних методів для підвищення ефективності управління IT-проєктами.

## Список використаних джерел


1. Мартиненко М.О., Бедрій Д.І. Особливості управління змістом IT-проєктів зі слабоформалізованими вимогами. *Штучний інтелект в інклюзивному розвитку*. AIID-2025: Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Відпов. за вип. П.О. Тесленко. Одеса : ІШІР, 2025. – С. 132-134. DOI: https://www.doi.org/10.5281/zenodo.19053150
2. Мартиненко М., Бедрій Д. Неконтрольоване розширення змісту як джерело ризиків IT-проєктів. Project, *Program, Portfolio Management. P3M-2025*: Тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції : [у 2т.]. Відповідальний за випуск П.О. Тесленко Том 1. Одеса. : ІШІР, 2025. С. 174-177. https://www.doi.org/10.5281/zenodo.18428325
3. Бедрій Д.І. Інтегроване протиризикове управління науковими проєктами в умовах невизначеності та переходу до циркулярної економіки: дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.22. Одеса: Державний університет "Одеська політехніка", 2021. 431 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1lZA3hLEwl8VL7K-sxwgjBThAW4S-_zq3/view
4. Путій І., Тесленко П. Аналіз сучасних підходів до управління складними IT-проєктами. *Управління розвитком складних систем*. 2024. Вип. 59. С. 81-88. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.59.81-88

# ICuRM: ФРЕЙМВОРК КООРДИНАЦІЇ РИЗИКІВ МІЖ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИМИ СИСТЕМАМИ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**Мей Ю.[1], Черненко Ю.[2], Строга А.[3], Борисова Н.[4]**
[1]WSHIU Academy of Applied Science, Poznan, Poland
[2]ЗВО «Міжнародний університет бізнесу і права», м. Херсон, Україна
[3]Вищий навчальний заклад «Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна
[4]ТОВ "Девлаб Україна", м. Київ, Україна

**Анотація.** У роботі запропоновано фреймворк ICuRM для координації ризиків між газовою, водною та тепловою / електричною інфраструктурою в реальному часі. Він усуває три проблеми спільного реагування: відсутність єдиної шкали ризику, нечіткі правила ескалації та повільний обмін подіями між суміжними службами. ICuRM поєднує три модулі: eURI – індекс ризику 0–100; ACM+ – адаптивну модель ескалації рішень із часовими вікнами реагування; CEDEX – захищений обмін подіями у форматі JSON/TLS. Пілот на чотирьох анонімізованих організаціях показав покращення операційних результатів у межах 15–25%, зокрема скорочення часу відновлення, зменшення затримок і швидше виявлення витоків. Фреймворк може інтегруватися в ERP-BPMS або SCADA-середовище як модуль міжорганізаційної координації.

**Ключові слова**: координація ризиків; критична інфраструктура; ICuRM; фреймворк координації; ескалація рішень; захищений обмін подіями.

# ICuRM: A FRAMEWORK FOR RISK COORDINATION BETWEEN INTERDEPENDENT LIFE-SUPPORT SYSTEMS

**Maj Ju.[1], Chernenko Y.[2], Stroha A.[3], Borysova N.[4]**
[1]WSHIU Academy of Applied Science, Poznan, Poland
[2]International University of Business and Law, Kherson, Ukraine
[3]«KROK» University of Economics and Law, Kyiv, Ukraine
[4]Devlab Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper proposes the ICuRM framework for real-time risk coordination between gas, water, and thermal / electrical infrastructure. It addresses three barriers to joint response: the lack of a unified risk scale, unclear escalation rules, and slow event exchange between adjacent services. ICuRM combines three modules: eURI, a 0–100 risk index; ACM+, an adaptive escalation model with response time windows; and CEDEX, secure JSON/TLS event exchange. A pilot across four anonymized organizations showed 15–25% operational improvements, including shorter recovery time, fewer delays, and faster leak detection. ICuRM can be integrated into ERP-BPMS or SCADA as an interorganizational coordination module.

**Keywords**: risk coordination; critical infrastructure; ICuRM; coordination framework; escalation of decisions; secure event exchange.

**Вступ.** Газові, водні, теплові та електричні мережі залишаються взаємозалежними, але ризики в них часто оцінюються окремо. Локальний збій у суміжній службі може спричинити каскадне порушення послуг, затримати ремонт і подовжити відновлення. Необхідність координованого реагування відображена у європейській рамці стійкості критичних суб'єктів та міжнародних настановах з інцидентного управління й обміну інформацією [1-3]. Наявні цифрові рішення підтримують внутрішні процеси організацій, однак не повністю закривають міжмережеву координацію в реальному часі [4-6]; систематичні огляди підтверджують нестачу єдиних підходів, що поєднують метрики ризику, ескалацію та обмін даними [7, 8].

**Мета роботи.** Розробити і перевірити фреймворк координації ризиків між взаємозалежними системами життєзабезпечення, що поєднує спільний індикатор ризику, правила ескалації та захищений обмін подіями між суміжними службами.

**Постановка проблеми.** Ізольоване управління ризиками у газових, водних, теплових та електричних мережах ускладнює спільне реагування на каскадні інциденти. Відсутність

єдиної шкали ризику, формалізованих правил ескалації та оперативного обміну подіями знижує ефективність суміжних служб і зумовлює потребу в інтегрованому фреймворку координації.

**Основна частина.** Фреймворк ICuRM побудований як єдиний цифровий контур із трьох модулів (рис. 1). eURI (Enhanced Unified Risk Index) формує індекс ризику 0–100, об'єднуючи ймовірність порушення, очікуваний вплив, каскадність, мінливість середовища, резервування та середній час відновлення. Завдяки цьому суміжні служби отримують спільну числову оцінку замість розрізнених локальних сигналів.

ACM+ (Adaptive Council Model Plus) переводить eURI в управлінське рішення: eURI < 30 — моніторинг; 30–50 — швидка координація до 10 хвилин; 50–70 — технічний комітет до 30 хвилин; eURI ≥ 70 — стратегічна рада до 90 хвилин. Це уточнює, хто діє, коли залучати керівництво і на якому рівні перерозподіляти ресурси.

CEDEX (Cross-Utility Event Data Exchange) забезпечує швидкий і захищений обмін подіями у форматі JSON/TLS. Архітектура ICuRM підтримує інтеграцію з ERP-BPMS або SCADA-середовищем.

Фреймворк працює в циклі DAPEL:

виявлення — оцінювання — планування реагування — виконання — навчання.

Система зберігає цифровий слід рішення, дає змогу коригувати пороги eURI, сценарії реагування та правила ескалації, тому придатна не лише для одноразової реакції, а й для накопичення організаційного досвіду.

Сигнали з газової, водної та теплової / електричної мереж агрегуються в eURI; ACM+ задає рівень ескалації; CEDEX забезпечує захищений обмін подіями; зворотний зв'язок Learn використовується для коригування порогів і сценаріїв.

Результати пілотної перевірки. ICuRM перевірено на чотирьох анонімізованих організаціях різного масштабу та цифрової зрілості: житлово-комунальному операторі, будівельно-іригаційній компанії, водному технологічному стартапі та великій енергетично-водній компанії. У всіх випадках порівнювався стан до і після впровадження.

Шестимісячний пілот показав покращення операційних показників у межах 15–25%: скорочення часу відновлення між суміжними мережами приблизно на 20%, зменшення затримок проєктів на 15%, швидше виявлення витоків на 25% та зниження простою під час великих інцидентів на 20%.

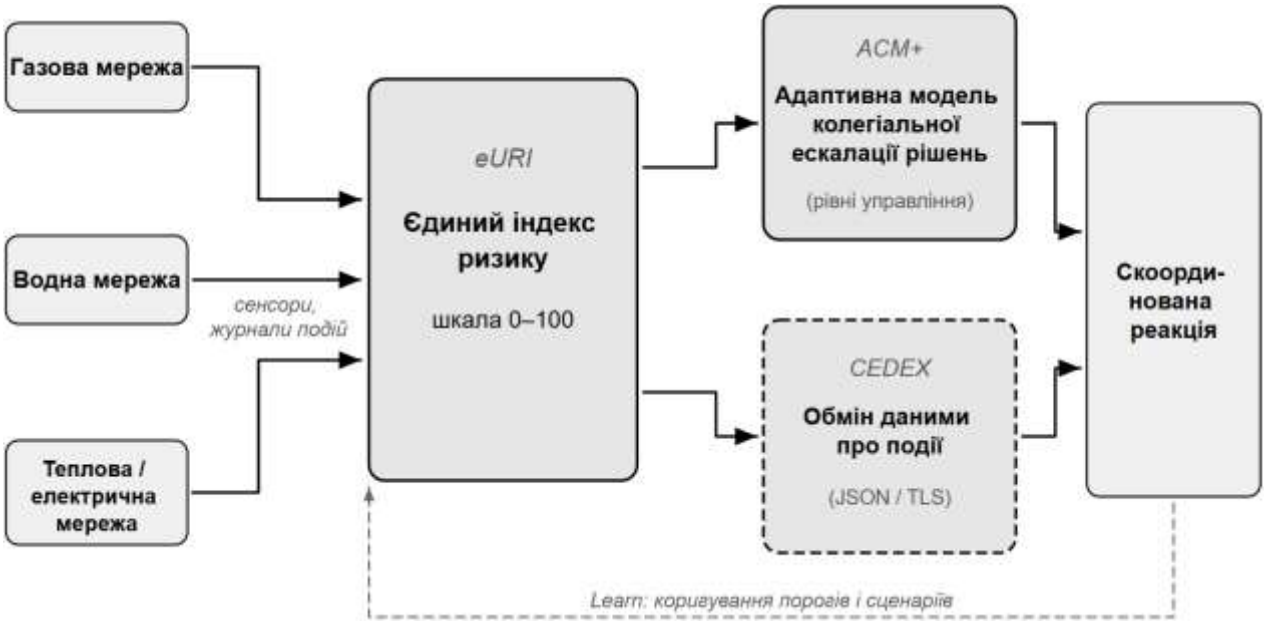



Рис. 1. Архітектура ICuRM для координації ризиків між суміжними системами життєзабезпечення

Стійкість eURI перевірено за 10 000 ітерацій Монте-Карло: при варіації вхідних параметрів ±30% відхилення індексу становило ±5–7%. Для CEDEX середня затримка обміну становила 0,9–1,4 с, максимальна — 1,5 с, а втрати пакетів були нижчими за 0,2%.

Отримані результати є контекстно залежними, але свідчать про переносимість фреймворку для організацій з різною цифровою зрілістю — від ERP-BPMS-контуру до SCADA-середовища.

Місце фреймворку в системі управління. ICuRM доцільно розглядати як спеціалізований модуль міжорганізаційної координації у ширшій системі інтегрованого протиризикового управління. У середовищі ERP-BPMS або SCADA він замикає саме міжорганізаційний рівень, роблячи рішення між службами відтворюваними, порівнюваними та придатними до аудиту.

**Висновки.**

1. ICuRM переводить фрагментовані сигнали з різних мереж у спільну шкалу ризику та прив’язує її до управлінських дій.
2. Поєднання eURI, ACM+ і CEDEX зменшує затримку між виявленням загрози та спільним реагуванням і дає вимірюваний операційний ефект.
3. Фреймворк може інтегруватися в ERP-BPMS або SCADA як модуль міжорганізаційної координації та масштабуватися на інші сектори критичної інфраструктури.

**Список використаних джерел**


1. Directive (EU) 2022/2557 of the European Parliament and of the Council on the resilience of critical entities. Official Journal of the European Union, 2022
2. ISO 22320:2018. Security and resilience — Emergency management — Guidelines for incident management. Geneva: ISO, 2018.
3. ISO 22396:2020. Security and resilience — Community resilience — Guidelines for information exchange between organizations. Geneva: ISO, 2020.
4. Chernenko, Y., Danchenko, O., Mysnyk, B., Bielova, O., Adamov, O. Optimizing Housing and Communal Services Management Through Digital Transformation and Integrated Information Systems. In: Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 222. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-71804-5_3.
5. Chernenko, Y., Teslenko, P. Integration of Stakeholder Management and Risk Management Methods in Projects of Housing and Communal Services Providers. Technology Audit and Production Reserves. 2024. Vol. 2, No. 4(76). P. 6–10. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.301995
6. Chernenko, Y., Bedrii, D., Haidaienko, O., Meliksetov, O. Mitigating Operational Risks in Critical Infrastructure Through Integrated ERP-BPMS: A Multi-Case Study. Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 3, No. 4(83). P. 53–63. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.330660
7. Brunner, L. G., Zorn, C., Logan, T. M., Peer, R. A. M., Paulik, R. Understanding cascading risks through real-world interdependent urban infrastructure. Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 241. Article 109653. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109653.
8. Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Navaratnam, S., Haraguchi, M. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. Infrastructures. 2022. Vol. 7, No. 5. Article 67. DOI: 10.3390/infrastructures7050067

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СКЛАДНИХ УМОВАХ З УРАХУВАННЯМ СТАНІВ ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА

**Максимов А.Є., Триус Ю.В.**
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація**. У дослідженні запропоновано підхід до побудови інформаційної технології багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах з урахуванням різних станів інформаційного середовища. В межах цього підходу розроблено модель багатокритеріального прийняття рішень, яка відображає взаємозв'язок між інформаційними ситуаціями в умовах ризику (Risk, *R*), невизначеності (Uncertainty, *U*) та нечіткої інформації (Fuzzy, *F*), а також модель процесу прийняття рішень. Запропонована модель MADMRUF забезпечує систематизацію процесу оцінювання альтернатив та створює основу для побудови алгоритмів інтеграції критеріїв та інформаційних ситуацій в єдину процедуру багатокритеріального прийняття рішень. Об'єктом дослідження є процес багатокритеріального прийняття рішень у складних інформаційних умовах, а предметом: методи та засоби побудови інформаційної технології підтримки прийняття рішень. Отримані результати можуть бути використані як основа для створення сучасних систем підтримки прийняття рішень.

**Ключові слова**: багатокритеріальне прийняття рішень; математичні моделі; моделі підтримки прийняття рішень; методи прийняття рішень; системи підтримки прийняття рішень; інформаційні технології; інформаційне середовище.

# INFORMATION TECHNOLOGY FOR MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING IN COMPLEX CONDITIONS CONSIDERING INFORMATION ENVIRONMENT STATES

**Maksymov A., Tryus Yu.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract**. The study proposes an approach to the development of an information technology for multicriteria decision-making under complex conditions, taking into account various states of the information environment. Within this approach, a multicriteria decision-making model has been developed that reflects the interrelation between information situations under conditions of risk (R), uncertainty (U), and fuzzy information (F), as well as a decision-making process model. The proposed MADMRUF model provides systematization of the alternative evaluation process and creates a basis for developing algorithms for integrating criteria and information situations into a unified multicriteria decision-making procedure. The object of the study is the process of multicriteria decision-making under complex information conditions, while the subject is the methods and tools for developing information technology for decision support. The obtained results can be used as a foundation for creating modern decision support systems.

**Keywords**: multicriteria decision-making; mathematical models; decision support models; decision-making methods; decision support systems; information technologies; information environment.

**Вступ**. У сучасних умовах функціонування складних соціально-економічних та технічних систем процес прийняття рішень відбувається під впливом різних інформаційних ситуацій, зокрема ризику, невизначеності та нечіткої інформації. Наявність багатьох критеріїв оцінювання альтернатив у поєднанні з такими умовами істотно ускладнює вибір ефективних управлінських рішень та потребує використання спеціалізованих методів багатокритеріального аналізу.

Попри значну кількість існуючих підходів багатокритеріального прийняття рішень (див., наприклад, [1-4]), відсутність інтегрованої концептуальної моделі, яка б системно поєднувала інформаційні ситуації типу Risk–Uncertainty–Fuzzy [5] та враховувала їх взаємозв'язки, ускладнює обґрунтований вибір відповідних методів і побудову інформаційних технологій підтримки прийняття рішень. Це зумовлює необхідність розробки узагальненої моделі, що дозволяє структуровано описати зазначені інформаційні ситуації, визначити їх роль у процесі багатокритеріального прийняття рішень і сформувати комплексний підхід до розв'язання відповідних задач.

**Мета роботи**. Метою дослідження є розроблення інформаційної технології багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах з урахуванням станів інформаційного середовища на основі запропонованої математичної моделі MADMRUF, що інтегрує в собі інформаційні ситуації прийняття рішень в умовах ризику (*R*), невизначеності (*U*) та нечіткої інформації (*F*), а також забезпечує систематизацію процесу оцінювання альтернатив, формалізацію взаємозв'язків між альтернативами, критеріями та інформаційними ситуаціями і створює основу для побудови адаптивних методів багатокритеріального прийняття рішень.

**Постановка задачі**. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити три основні завдання: побудувати математичну модель задачі багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах з урахуванням станів інформаційного середовища; розробити модель процесу прийняття рішень на основі цієї моделі; визначити методи, за допомогою яких розв'язуються різні варіанти задачі багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах з урахуванням станів інформаційного середовища, реалізувати запропоновані моделі і методи у вигляді веб-орієнтованої системи підтримки прийняття рішень.

У дослідженні розглядається задача багатокритеріального прийняття рішень, що полягає у виборі найкращої альтернативи з множини можливих варіантів $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ у відповідності до множини критеріїв $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$, за якими здійснюється оцінювання цих альтернатив, з урахуванням множини можливих станів $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S\}$ середовища $E$ та інформаційних ситуацій прийняття рішень в умовах ризику, невизначеності та нечіткої інформації.

**Вирішення проблеми**. Для розв'язання поставленої задачі створено математичну модель багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Attribute Decision Making under conditions of risk, uncertainty and fuzzy information, MADMRUF), що формально може бути представлена так:

$$MADMRUF = \{C, W, A, \Theta, P, U, L, F\mu\}, \quad (1)$$

де: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ – *множина критеріїв прийняття рішень*, що характеризують альтернативи і мають певний пріоритет один відносно одного, задані *множиною ваг критеріїв* $W = \{w_1, w_2, \dots, w_M\}$; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ – *множина можливих альтернатив*; $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S\}$ – *множина можливих станів середовища* $E$;

$P$ – *множина рівнів ризику* за відповідними станами середовища $E$: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_q\}$, $1 \le q \le S$, $p_j = p(\theta_j)$ – ймовірність настання стану $\theta_j$ середовища $E$, які задовольняють умову $p_j \in [0; 1]$, $j = \overline{1, q}$;

$U$ – *множина рівнів невизначеності* за відповідними станами середовища: $U = \{u_{q+1}, u_{q+2}, \dots, u_S\}$, при цьому, якщо $q = 0$, то має місце ситуація *повної невизначеності* (відсутності інформації про множину рівнів ризику $P$, тобто, $P = \emptyset$), у цьому випадку, як правило, покладають: $u_j = 1/S$, $j = \overline{1, S}$, якщо в (3) $q \ge 1$, то маємо ситуацію *часткової невизначеності,* у цьому випадку, як правило, покладають: $u_j = \frac{1-\sum_{r=1}^{q} p_r}{S-q}$, $u_j \in [0,1]$, $j = \overline{q+1, S}$, при цьому для елементів множин $P$ і $U$ виконується умова: $\sum_{j=1}^{q} p_j + \sum_{j=q+1}^{S} u_j = 1$;

$L$ – *множина оцінок* виду $L = \{L_1, L_2, \dots, L_r\}$, де $L_i$ – значення з певних шкал, що використовуються експертами для оцінювання альтернатив за відповідними критеріями, при цьому ці шкали можуть бути як кількісними, так і якісними (нечіткими);

$F\mu$ – *оцінний функціонал,* що містить значення виду $f\mu_{ij}^k \in L$ – оцінка альтернативи $A_i$ за критерієм $C_k$, коли середовище перебуває у стані $\theta_j$ ($i = \overline{1, N}, j = \overline{1, S}, k = \overline{1, M}$), при цьому можливі такі варіанти:

1) $f\mu_{ij}^k = f_{ij}^k$, коли всі оцінки є кількісними (чіткими);

2) $f\mu_{ij}^k = \mu_{ij}^k$, коли всі оцінки є якісними (нечіткими);

3) коли частина оцінок $f\mu_{ij}^k$ можуть бути чіткими, а частина нечіткими, тобто виконується умова, $f\mu_{ij}^k = f_{ij}^k$, $f\mu_{lm}^k = \mu_{lm}^k$, де $l \ne i$, $m \ne j$.

На основі запропонованої моделі (1) можна виділити основні етапи процесу прийняття рішень *MDMPRUF*, які більш детально розглянуті в роботі авторів [5].

Етап 1. Постановка задачі прийняття рішень. Цей етап визначає контекст і умови, в яких приймається рішення.

Етап 2. Аналіз задачі та визначення інформаційної ситуації прийняття рішень. Цей етап об'єднує два важливих завдання: глибокий аналіз задачі та визначення інформаційної ситуації прийняття рішень. Метою цього етапу є детальне дослідження вихідних даних, вимог і умов задачі для того, щоб створити повне уявлення про проблему та її контекст.

Етап 3. Класифікація задачі прийняття рішень. На основі попередніх етапів визначається тип задачі та відповідні інформаційні ситуації прийняття рішень.

Етап 4. Побудова моделі задачі прийняття рішень. На цьому етапі створюється математична модель задачі прийняття рішень, наприклад, на основі моделі $MADMRUF$ (1).

Етап 5. Вибір методів прийняття рішень. На цьому етапі здійснюється вибір одного або кількох методів, які найбільш адекватно враховують специфіку моделі задачі (1), тип вхідної інформації, умови ризику та невизначеності, а також вимоги до точності, надійності та швидкості одержання результатів.

Етап 6. Аналіз кількості обраних методів. Якщо обрано один метод, користувач за допомогою системи підтримки прийняття рішень (СППР) розв'язує задачу відповідно до нього та переходить до етапу 7. Якщо обрано кілька методів, визначаються їх ваги, виконується послідовне розв'язання задачі та агрегування результатів в єдине рішення.

Етап 7. Виведення результатів та надання рекомендацій. Формування рекомендацій базується на результатах застосування методів прийняття рішень, обраних користувачем, які можуть бути представлені у вигляді вектору пріоритетів, рангів, тощо.

У межах цього дослідження розвивається СППР «Decisioner» [6], до засобів розробки якої відносяться: PHP, MySQL, JavaScript, jQuery, CMS WordPress. Також розробляються модифіковані, комбіновані і гібридних методи, що розв'язують задачі прийняття рішень у різних інформаційних ситуаціях, й можуть бути використані на етапі 5 запропонованого процесу прийняття рішень *MDMPRUF*.

**Висновок.** У дослідженні розроблено підхід до побудови інформаційної технології багатокритеріального прийняття рішень у складних умовах з урахуванням різних станів інформаційного середовища на основі запропонованої загальної моделі багатокритеріального прийняття рішень MADMRUF, яка відображає взаємозв'язок між умовами ризику (Risk, R), повної невизначеності (Uncertainty, U) та нечіткої інформації (Fuzzy, F). Запропонована модель дозволяє формалізувати різні інформаційні ситуації прийняття рішень та забезпечує їх системну класифікацію в межах єдиного підходу. Результати дослідження продемонстрували, що модель MADMRUF узгоджується з класичними та сучасними підходами у сфері багатокритеріального прийняття рішень, зокрема методами MADM.

## Список використаних джерел


1. Gomes, M. I., & Martins, N. C. (2022). *Mathematical Models for Decision Making with Multiple Perspectives: An Introduction*. Boca Raton, FL: CRC Press. 300 p.
2. Nayli, A. A., Radzi, N. A. M., & Wan Ahmad, W. S. H. M. (2021). Multi-criteria decision making: A systematic review. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 14*(8). https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443
3. Kumar, R., & Pamucar, D. (2025). A Comprehensive and Systematic Review of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods to Solve Decision-Making Problems: Two Decades from 2004 to 2024. *Spectrum of Decision Making and Applications*, *2*(1), 177-196. https://doi.org/10.31181/sdmap21202524
4. Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, *3*(1), 77-87. https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006
5. Maksymov, A., & Tryus, Yu. (2026). Models of information situations of decision-making under conditions of risk, uncertainty, and fuzzy information. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, *31*(1), 143-153. https://doi.org/10.62660/bcstu/1.2026.143
6. Decisioner. (n.d.). Decision support system. Retrieved May 8, 2026, from https://dss.knsa.chdtu.edu.ua/

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СКОРИНГОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВИХ РИЗИКІВ У ПРОЄКТАХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

**Манн Р.[1], Олійник А.[2], Заяц О.[2], Рибалко І.[4]**
[1]Akademia Humanitas Humanitas University, Sosnowiec, Poland
[2]Національний транспортний університет, м. Київ, Україна
[3]Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна

**Анотація.** Цифровізація транспортної галузі супроводжується зростанням кількості та складності цифрових ризиків у проєктах автомобільних перевезень. У роботі запропоновано інформаційну технологію скорингового оцінювання цифрових ризиків, побудовану на системі зважених критеріїв, згрупованих у технічний, адміністративний та фізичний блоки. Запропонований підхід дає змогу розраховувати інтегральний скоринговий показник цифрового ризику (SDR) на основі субіндексів блоків і відносити проєкт до однієї з чотирьох зон ризику для підтримки прийняття управлінських рішень. Технологія може бути використана на етапах ініціації, планування та моніторингу проєктів автомобільних перевезень.

**Ключові слова:** цифрові ризики, інформаційна технологія, скорингова модель, проєкти автомобільних перевезень, управління ризиками, інтегральний показник.

# INFORMATION TECHNOLOGY FOR SCORING-BASED ASSESSMENT OF DIGITAL RISK IN ROAD TRANSPORT PROJECTS

**Mann R.[1], Oliinyk A.[2], Zaiats O.[2], Rybalko I.[3]**
[1]Akademia Humanitas Humanitas University, Sosnowiec, Poland
[2]National Transport University, Kyiv, Ukraine
[3]KROK University, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The digitalization of the transport industry is accompanied by the growing number and complexity of digital risks in road transport projects. The paper proposes an information technology for scoring-based assessment of digital risks based on a system of weighted criteria grouped into three blocks: technical, administrative, and physical. The proposed approach enables the calculation of the integral Digital Risk Scoring indicator (SDR) from the block sub-indices and assigns the project to one of four risk zones to support management decision-making. The technology can be used at the stages of initiation, planning, and monitoring of road transport projects.

**Keywords**: digital risks, information technology, scoring model, road transport projects, risk management, integral indicator.

**Вступ.** Цифрова трансформація автомобільних перевезень передбачає широке застосування GPS-моніторингу, IoT-пристроїв, систем управління транспортом (TMS), хмарних платформ і цифрового документообігу. Ці інформаційні технології підвищують операційну ефективність транспортних проєктів, однак водночас посилюють їхню залежність від цифрової інфраструктури та формують нові кіберфізичні вразливості. Для інтелектуальних транспортних систем проблема кіберстійкості набула системного характеру та потребує структурованих підходів до оцінювання [1]. Дослідження ENISA підтверджують, що цифрові загрози в секторі автомобільних і підключених перевезень охоплюють атаки на бортові системи, збої хмарних платформ і порушення цілісності логістичних даних [2]. У попередніх дослідженнях авторів цифрові ризики у проєктах автомобільних перевезень систематизовано за технічними, адміністративними та фізичними ознаками [3]. Водночас ISO 31000 не забезпечує галузево адаптованого компактного інструменту для експрес-оцінювання цифрової вразливості транспортного проєкту [4].

**Мета роботи.** Розробити інформаційну технологію скорингового оцінювання цифрових ризиків у проєктах автомобільних перевезень, яка забезпечує розрахунок інтегрального скорингового показника цифрового ризику та підтримку прийняття управлінських рішень.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети необхідно побудувати інформаційно-аналітичний інструмент, здатний агрегувати сукупність різнорідних факторів цифрового ризику в єдиний кількісний індикатор із чіткою управлінською інтерпретацією. Методологічною основою такого підходу є скорингова логіка, яка широко застосовується у банківській практиці для прогнозування кредитного ризику на основі системи зважених критеріїв [5]. Її адаптація до оцінювання цифрових ризиків транспортних проєктів є методологічно виправданою, оскільки в обох випадках ідеться про інтегрування різнорідних факторів в один числовий показник.

**Вирішення проблеми.** Структуру запропонованої інформаційної технології скорингового оцінювання цифрових ризиків та логіку переходу від блоків ризиків до інтегрального скорингового показника цифрового ризику наведено на рис. 1.




Рис. 1. Структурно-логічна схема інформаційної технології скорингового оцінювання цифрових ризиків у проєктах автомобільних перевезень

Запропонована інформаційна технологія реалізується у формі трирівневої скорингової моделі: перший рівень становлять три блоки ризиків; другий рівень — система зважених критеріїв у межах кожного блоку; третій рівень — субіндекси технічного, адміністративного та фізичного блоків, на основі яких визначається інтегральний скоринговий показник цифрового ризику SDR. Технічний блок охоплює ризики, пов'язані із захищеністю доступів і даних, резервуванням, надійністю систем GPS-моніторингу, IoT-пристроїв, телематики та інтегрованої цифрової інфраструктури транспортного проєкту. Адміністративний блок характеризує цифрову компетентність персоналу, чіткість регламентів і ролей, історію інцидентів, наявність моніторингу та відповідність вимогам кібербезпеки. Фізичний блок відображає потенційний вплив цифрового збою на безпеку перевезень і безперервність транспортного процесу.

Оцінювання кожного критерію здійснюється за шкалою від 0 до 4, де 0 означає контрольований ризик, а 4 - критичну вразливість. Для кожного блоку використовується система вагових коефіцієнтів критеріїв $w_{ij}$, нормованих у межах відповідного блоку. Субіндекс блоку визначається за формулою:

$$S_j = 25 \cdot \sum_{i \in j} (w_{ij} \cdot b_i),$$

де $S_j$ - субіндекс $j$-го блоку, $w_{ij}$ - вага $i$-го критерію в межах $j$-го блоку, $b_i$ - бальна оцінка $i$-го критерію. Коефіцієнт 25 забезпечує нормування значення субіндексу до шкали 0–100.

Інтегральний скоринговий показник цифрового ризику визначається як зважена сума блокових субіндексів:

$$SDR = \alpha \cdot S_T + \beta \cdot S_A + \gamma \cdot S_P,$$

де $\alpha + \beta + \gamma = 1$. У запропонованій моделі $\alpha = 0{,}47$, $\beta = 0{,}41$, $\gamma = 0{,}12$; ці коефіцієнти визначено пропорційно до сумарних ваг критеріїв у технічному, адміністративному та фізичному блоках відповідно.

За значенням SDR проєкт відноситься до однієї з чотирьох зон: низький ризик (0–24) - поточний моніторинг; помірний (25–49) - превентивні заходи; високий (50–74) - термінові заходи; критичний (75–100) - негайне втручання. Така прив'язка числового результату до управлінської реакції відповідає рамці NIST CSF 2.0, яка акцентує увагу на виявленні, пріоритизації, комунікації та виборі дій реагування на кіберризики [6].

Запропонована модель може застосовуватися на всіх етапах життєвого циклу проєкту: під час ініціації для попередньої діагностики цифрової вразливості; на етапі планування для обґрунтування пріоритетів захисту, резервування та навчання персоналу; на етапі моніторингу для відстеження динаміки ризику. Таким чином, модель формує послідовність переходу від концептуального бачення цифрових ризиків [3] до їх структурованого кількісного оцінювання та подальшого прийняття управлінського рішення.

**Висновок.** Запропонована інформаційна технологія скорингового оцінювання цифрових ризиків адаптує логіку скорингового підходу [5] до оцінювання цифрових ризиків у проєктах автомобільних перевезень та формує критеріальну систему, релевантну специфіці цифровізації транспортної діяльності. Трирівнева ієрархічна структура моделі забезпечує розрахунок субіндексів цифрового ризику за технічним, адміністративним та фізичним блоками з подальшим агрегуванням їх в інтегральний скоринговий показник цифрового ризику SDR. Це дозволяє визначати зону ризику проєкту та ідентифікувати блок, що формує найбільшу вразливість, без застосування складних статистичних методів. Перспективою подальших досліджень є апробація моделі на реальних транспортних проєктах, уточнення вагових коефіцієнтів за результатами експертного оцінювання та автоматизація скорингового оцінювання у складі цифрового інструменту підтримки рішень.

## Список використаних джерел


1. Belokas G., Saroglou H., Moschovou T., Vlahogianni E. I. Enhancing the cyber-resilience of intelligent transport systems through adaptive frameworks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 161. Article 104431. https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104431
2. ENISA; JRC. *Cybersecurity Challenges in the Uptake of Artificial Intelligence in Autonomous Driving*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. 100 p.
3. Заяц О. В., Олійник А. С. Ризики цифрової трансформації в проєктах автомобільних перевезень. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 71–78. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.71-78
4. ISO 31000:2018. *Risk Management — Guidelines*. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 16 p.
5. Thomas L. C. A survey of credit and behavioural scoring: forecasting financial risk of lending to consumers. *International Journal of Forecasting*. 2000. Vol. 16, No. 2. P. 149–172. https://doi.org/10.1016/S0169-2070(00)00034-0
6. NIST. The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0. NIST CSWP 29. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2024. https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29

# АДАПТИВНО-РЕЗИЛЬЄНТНА КОГНІТИВНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ІТ-РИЗИКАМИ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**Moskov V.[1], Строкань Д.[2], Мисник Л.[2]**
[1]Academy of Economics and Pedagogy, Prague, Czech Republic
[2]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі запропоновано адаптивно-резильєнтну когнітивну модель управління ІТ-ризиками проєктів відновлюваної енергетики. Розглядаються особливості формування ІТ-ризиків у цифровізованих енергетичних системах, зокрема в умовах використання SCADA-систем, IoT та аналітики даних. Запропонована модель базується на багаторівневій архітектурі, яка включає сенсорний, інтерпретаційний, прогностично-адаптивний та рівень резильєнтного реагування. Особливу увагу приділено когнітивній петлі адаптації та використанню цифрових двійників для прогнозування ризиків. Об'єктом дослідження є процес управління ІТ-ризиками у проєктах відновлюваної енергетики в умовах цифровізації енергетичних систем. У роботі запропоновано адаптивно-резильєнтну когнітивну модель управління ІТ-ризиками (ARKM-ITR), яка базується на багаторівневій архітектурі та включає сенсорний, інтерпретаційний, прогностично-адаптивний і рівень резильєнтного реагування. Особливістю моделі є використання когнітивної петлі адаптації, графів ризиків та цифрових двійників для прогнозування і вибору управлінських рішень. У результаті дослідження обґрунтовано можливість переходу від реактивного до проактивного управління ІТ-ризиками, підвищення точності їх прогнозування, скорочення часу реагування на інциденти та забезпечення стійкості енергетичних систем до зовнішніх і внутрішніх загроз.

**Ключові слова:** ІТ-ризики, відновлювана енергетика, резильєнтність, когнітивні системи, цифровий двійник, кібербезпека.

# ADAPTIVE-RESILIENT COGNITIVE MODEL OF IT RISK MANAGEMENT OF RENEWABLE ENERGY PROJECTS

**Moskov V.[1], Strokan D.[2], Mysnyk L.[3]**
[1]Academy of Economics and Pedagogy, Prague, Czech Republic,
[2]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper proposes an adaptive-resilient cognitive model for managing IT risks in renewable energy projects. The features of IT risk formation in digitalized energy systems are considered, in particular in the context of using SCADA systems, IoT, and data analytics. The proposed model is based on a multi-level architecture that includes sensory, interpretive, predictive-adaptive, and resilient response levels. Particular attention is paid to the cognitive adaptation loop and the use of digital twins for risk prediction. The object of the study is the process of managing IT risks in renewable energy projects in the context of digitalization of energy systems. The paper proposes an adaptive-resilient cognitive model of IT risk management (ARKM-ITR), which is based on a multi-level architecture and includes sensory, interpretive, predictive-adaptive and resilient response levels. The model features the use of a cognitive adaptation loop, risk graphs and digital twins for forecasting and selecting management decisions. The study substantiates the possibility of transitioning from reactive to proactive IT risk management, increasing the accuracy of their forecasting, reducing incident response time and ensuring the resilience of energy systems to external and internal threats.

**Keywords:** IT risks, renewable energy, resilience, cognitive systems, digital twin, cybersecurity.

**Вступ.** Сучасний розвиток відновлюваної енергетики характеризується активною інтеграцією інформаційних технологій у всі етапи функціонування енергетичних систем — від генерації та накопичення енергії до її розподілу та споживання. Використання SCADA-систем, інтернету речей (IoT), хмарних сервісів і технологій аналізу великих даних дозволяє підвищити ефективність управління енергетичними об'єктами, забезпечити оптимізацію виробничих процесів та покращити якість прогнозування генерації електроенергії з відновлюваних джерел [1].

Разом із тим, цифровізація енергетичної галузі зумовлює суттєве зростання кількості та складності ІТ-ризиків. До таких ризиків належать кіберзагрози, відмови інформаційних систем, помилки обробки даних, а також організаційні недоліки управління ІТ-інфраструктурою. Реалізація зазначених ризиків може призвести до порушення стабільності функціонування енергетичних систем, фінансових втрат та зниження рівня енергетичної безпеки[2].

Особливої актуальності проблема управління ІТ-ризиками набуває у проєктах відновлюваної енергетики, які характеризуються високим рівнем залежності від цифрових технологій, динамічністю зовнішнього середовища та складною структурою взаємодії між компонентами системи.[3]. У таких умовах традиційні підходи до управління ризиками, що базуються на лінійних та переважно реактивних моделях, не забезпечують необхідного рівня ефективності[4].

З огляду на це виникає потреба у розробці нових підходів до управління ІТ-ризиками, які б поєднували можливості прогнозування, адаптації та самонавчання. Одним із перспективних напрямів є використання когнітивних моделей, що дозволяють враховувати контекст середовища, аналізувати взаємозв'язки між ризиками та формувати обґрунтовані управлінські рішення в умовах невизначеності.

**Мета роботи.** Метою роботи є проаналізувати особливості формування ІТ-ризиків у проєктах відновлюваної енергетики та розробити структуру адаптивно-резильєнтної когнітивної моделі, яка забезпечує підвищення ефективності функціонування енергетичних систем шляхом прогнозування ризиків, адаптивного реагування та самонавчання в умовах динамічного цифрового середовища.і оцінити ефективність запропонованого підходу з точки зору підвищення стійкості та зниження впливу ІТ-ризиків.

**Постановка задачі.** Постановка задачі полягає у розробці такої моделі управління ІТ-ризиками, яка здатна враховувати контекст середовища, забезпечувати прогнозування ризиків, підтримувати прийняття рішень у реальному часі та адаптуватися до змін умов функціонування системи.

**Основна частина.** Для вирішення поставленої задачі в роботі запропоновано адаптивно-резильєнтну когнітивну модель управління ІТ-ризиками проєктів відновлюваної енергетики, яка враховує специфіку функціонування сучасних енергетичних систем, що характеризуються високим рівнем цифровізації, складністю взаємодії компонентів та динамічністю зовнішнього середовища. Запропонована модель побудована як багаторівнева адаптивна система, здатна до самонавчання, прогнозування ризиків та перебудови власної структури у відповідь на зміну умов функціонування.

Архітектура моделі базується на інтеграції чотирьох функціональних рівнів, які забезпечують повний цикл управління ІТ-ризиками. Початковим етапом є сенсорний рівень, який виконує функції збору, агрегування та попередньої обробки даних, що надходять із різних джерел, включаючи:

- SCADA-систем;
- IoT-пристроїв;
- мережевої інфраструктури;
- журналів подій;
- зовнішніх джерел (метеорологічні дані, ринок електроенергії).

Важливою особливістю цього рівня є не лише накопичення даних, але й їх контекстуалізація, що дозволяє враховувати умови функціонування енергетичної системи, зокрема зовнішні фактори, такі як погодні умови, зміни попиту на електроенергію або коливання ринку. Такий підхід створює основу для більш точного та обґрунтованого аналізу ризиків на наступних етапах.

На інтерпретаційному рівні здійснюється аналіз отриманих даних із використанням методів інтелектуального аналізу та машинного навчання. У межах цього рівня відбувається:

- виявлення аномалій із використанням методів машинного навчання;
- ідентифікація потенційних ІТ-ризиків;

– побудова графової моделі ризиків;
– визначення причинно-наслідкових зв’язків між подіями.

Використання графової моделі ризиків, у якій кожен ризик розглядається як елемент складної динамічної мережі взаємозв’язків дозволяє враховувати не лише окремі події, але й їх взаємний вплив, а також можливість виникнення каскадних ефектів, коли реалізація одного ризику спричиняє появу інших.

Наступним етапом є прогностично-адаптивний рівень, який забезпечує прогнозування розвитку ризиків та підтримку прийняття управлінських рішень. У рамках даного рівня здійснюється:

– оцінку ймовірності виникнення ризиків;
– прогнозування їх впливу на систему;
– моделювання сценаріїв розвитку подій;
– використання концепції цифрового двійника (Digital Twin);
– оптимізацію управлінських рішень.

Особливу роль відіграє використання концепції цифрового двійника, яка дозволяє створити віртуальну модель енергетичної системи та проводити експерименти без втручання в реальну інфраструктуру. Це дає змогу оцінювати ефективність різних стратегій реагування ще до їх практичного застосування та обирати оптимальні рішення з урахуванням критеріїв ефективності та стійкості.

Заключний рівень резильєнтного реагування забезпечує реалізацію управлінських впливів та відновлення системи після виникнення інцидентів. На цьому етапі здійснюється:

– автоматичне реагування на загрози;
– локалізація та ізоляція проблемних компонентів;
– відновлення працездатності системи;
– адаптація структури ІТ-інфраструктури.

Важливою особливістю є те, що модель орієнтована не лише на ліквідацію наслідків ризиків, але й на підвищення стійкості системи шляхом її перебудови та вдосконалення.

Інтеграція всіх рівнів моделі здійснюється через когнітивну петлю адаптації, яка включає етапи сприйняття, інтерпретації, моделювання, адаптації та навчання. Такий підхід забезпечує безперервний цикл вдосконалення системи управління ризиками, у межах якого накопичений досвід використовується для підвищення точності прогнозування та ефективності прийняття рішень. У результаті система набуває властивостей самонавчання та здатності до адаптації в умовах невизначеності.

Формалізація процесу управління ризиками в рамках запропонованої моделі передбачає визначення рівня ризику як функції не лише ймовірності його виникнення та величини впливу, але й контексту середовища та адаптивності системи. У межах запропонованої адаптивно-резильєнтної когнітивної моделі рівень ІТ-ризику розглядається як динамічна величина, що залежить не лише від класичних параметрів, але й від характеристик середовища та властивостей самої системи. Базова функція ризику має вигляд:

$$Ri(t) = Pi(t) \cdot Ii(t) \cdot Ci(t) \cdot (1 - A(t)),$$

де:

$Ri(t)$ – рівень і-го ризику в момент часу *t*;
$Pi(t)$ – ймовірність виникнення ризику;
$Ii(t)$ – величина впливу ризику;
$Ci(t)$ – контекстний коефіцієнт (умови середовища);
$A(t)$ – коефіцієнт адаптивності системи.




Рис. 1. Адаптивно-резильєнтна когнітивна модель управління ІТ-ризиками проєктів відновлюваної енергетики

Запропонована модель (рис. 1) забезпечує суттєві переваги порівняно з традиційними підходами, оскільки дозволяє здійснювати проактивне управління ризиками, враховувати їх взаємозв'язки, використовувати прогнозування та симуляцію, а також забезпечувати адаптацію системи в реальному часі. У результаті підвищується рівень надійності, безпеки та стійкості енергетичних систем, що є критично важливим для ефективного функціонування проєктів відновлюваної енергетики в умовах цифрової трансформації..

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження розглянуто адаптивно-резильєнтну когнітивну модель управління ІТ-ризиками проєктів відновлюваної енергетики, яка, на відміну від існуючих підходів, базується на поєднанні когнітивного аналізу, адаптивного управління та принципів резильєнтності. Запропонована модель формалізує процес управління ризиками як динамічну багаторівневу систему, що враховує не лише ймовірність і вплив ризиків, але й контекст середовища та здатність системи до адаптації.

## Список використаних джерел


1. Строкань Д.В., Ткаченко В.Ф. Модель SURE-RM для управління іт-ризиками в проєктах відновлюваної енергетики матеріали XXII міжнародної конференції «Управління проєктами у розвитку суспільства» Київ: КНУБА, 2025. С. 267-271
2. Данченко О.Б., Строкань Д.В., Цифрова енергетика в Україні - розбудова інноваційного майбутнього. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції Project, Program, Portfolio Management. P3M-2024: Тези доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції : [у 2т.]. // Відповідальний за випуск П.О. Тесленко — Том 1. — Одеса.: Інститут штучного інтелекту та робототехніки, 2024.- 255, с.200-205.
3. Семко І.Б., Строкань Д.В., Бєлов О.Є. Аналіз інформаційних ризиків в проєктах відновлюваної енергетики. Project, Program, Portfolio Management. P3M-2022: Тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції : [у 2т.]. // Відповідальний за випуск П.О. Тесленко. Том 1. Одеса. : ІШІР, 2022. 189 с. С.77-80.
4. Семко І.В. Ткаченко В.Ф, Строкань Д.В, "ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ." Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та програмами», Коблево, 12–15 вересня 2023 р. Збірник праць.–Харків: ХНУРЕ, 2023.–224 с. (2023): 192.

# СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ КОМАНД ДЛЯ ПРОЄКТІВ СЦЕНАРНОГО ПЛАНУВАННЯ

**Мушинський О.Ю., Мічківський С.М., Бевзюк Н.С.**
Університет економіки та права «КРОК», Київ, Україна

**Анотація**. У матеріалах роботи розглянуто проблему формування експертних команд для реалізації проєктів сценарного планування на проєктно-орієнтованих підприємствах в умовах турбулентності. Метою дослідження є розроблення моделі формування експертної команди, яка забезпечує відтворюваний добір учасників на основі кількісного оцінювання їхніх професійних, поведінкових і комунікативних характеристик. Завдання дослідження полягають у визначенні ключових характеристик експертів, формалізації параметрів оцінювання кандидатів, побудові цільової функції, визначенні системи обмежень і розробленні алгоритму реалізації моделі. Об'єктом дослідження є процес формування експертних команд у проєктно-орієнтованих підприємствах. Предметом дослідження є модель багатокритеріального добору експертів для реалізації проєктів сценарного планування з урахуванням hard skills, soft skills, достовірності експертних суджень і синергії взаємодії між учасниками. У роботі використано методи системного аналізу, проєктного підходу, багатокритеріального оцінювання, експертного оцінювання та математичного моделювання. Результатом дослідження є параметричний опис моделі, цільова функція та алгоритм формування експертної команди для сценарного планування. Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості переходу від інтуїтивного добору фахівців до відтворюваного оцінювання командної конфігурації, що враховує не лише індивідуальні компетентності експертів, а й якість їхньої взаємодії під час роботи з альтернативними сценаріями розвитку подій.

**Ключові слова**: сценарне планування, експертна команда, системна модель, проєктно-орієнтоване підприємство.

# SYSTEM MODEL FOR FORMING EXPERT TEAMS FOR SCENARIO PLANNING PROJECTS

**Mushynskyi O., Michkivskyy S., Bevziuk N.**
«KROK» University Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper examines the issue of forming expert teams to implement scenario planning projects in project-oriented enterprises under conditions of turbulence. The aim of the study is to develop a model for forming an expert team that ensures a reproducible selection of participants based on a quantitative assessment of their professional, behavioural and communicative characteristics. The objectives of the study are to identify the key characteristics of experts, formalise the parameters for assessing candidates, construct an objective function, define a system of constraints and develop an algorithm for implementing the model. The object of the study is the process of forming expert teams in project-oriented enterprises. The subject of the study is a multi-criteria model for the selection of experts to implement scenario planning projects, considering hard skills, soft skills, the reliability of expert judgements and the synergy of interaction between participants. The study employs methods of systems analysis, the project approach, multi-criteria evaluation, expert assessment and mathematical modelling. The results of the study comprise a parametric description of the model, an objective function and an algorithm for forming an expert team for scenario planning. The practical value of the proposed approach lies in the possibility of moving from the intuitive selection of specialists to a reproducible assessment of team configuration, which considers not only the individual competencies of experts but also the quality of their interaction when working with alternative scenarios of events.

**Keywords**: scenario planning, team of experts, system model, project-oriented organisation.

**Вступ**. У сучасних умовах зростання турбулентності зовнішнього середовища та ускладнення стратегічних рішень проєктно-орієнтовані підприємства потребують інструментів, здатних забезпечити системне опрацювання альтернативних варіантів майбутнього. Одним із таких інструментів є сценарне планування, яке дає змогу моделювати можливі напрями розвитку подій, виявляти критичні фактори впливу та формувати основу

для підготовки обґрунтованих управлінських рішень. Проєкти сценарного планування виокремлюють як самостійний тип проєктів поряд із проєктами підтримки функціонування, зростання та розвитку [1]. Разом з цим, ефективність сценарного планування значною мірою залежить від якості взаємодії експертів, оскільки саме експертні команди забезпечують інтерпретацію слабких сигналів, формування припущень, оцінювання альтернативних сценаріїв і підготовку стратегічних висновків.

**Мета роботи**. Розробити модель формування експертних команд для реалізації проєктів сценарного планування на проєктно-орієнтованих підприємствах, що забезпечує відтворюваний добір складу команди на основі кількісного оцінювання компетентності, достовірності суджень і поведінкових характеристик експертів з урахуванням вимог турбулентного середовища.

**Постановка задачі**. Результативність сценарного планування залежить від компетентності та узгодженої роботи експертної команди, здатної не лише генерувати альтернативні сценарії, а й оцінювати їхню ймовірність, наслідки та взаємний вплив. В умовах турбулентного середовища така команда має поєднувати фахівців із різним професійним досвідом, стилями мислення та поведінковими характеристиками. Це підвищує якість аналізу, але водночас ускладнює комунікацію та узгодження позицій. Тому формування експертної команди доцільно розглядати не лише як задачу добору фахівців за рівнем компетентності, а як задачу створення конфігурації команди, що забезпечує продуктивну взаємодію, довіру, психологічну безпеку та здатність переглядати припущення під впливом нових сигналів середовища [2].

**Вирішення проблеми**. Для формалізації процесу формування експертної команди запропоновано системну модель (рис. 1), у якій вхідним елементом є початковий пул кандидатів, а вихідним результатом, раціональний склад експертної команди для реалізації проєкту сценарного планування. Центральною системною проблемою визначено невідповідність складу експертної команди вимогам сценарного проєкту. Така невідповідність проявляється у недостатньому покритті предметних доменів, низькій компетентності окремих експертів, високому рівні конформізму, недостатній готовності до командної взаємодії та низькій достовірності експертних суджень.

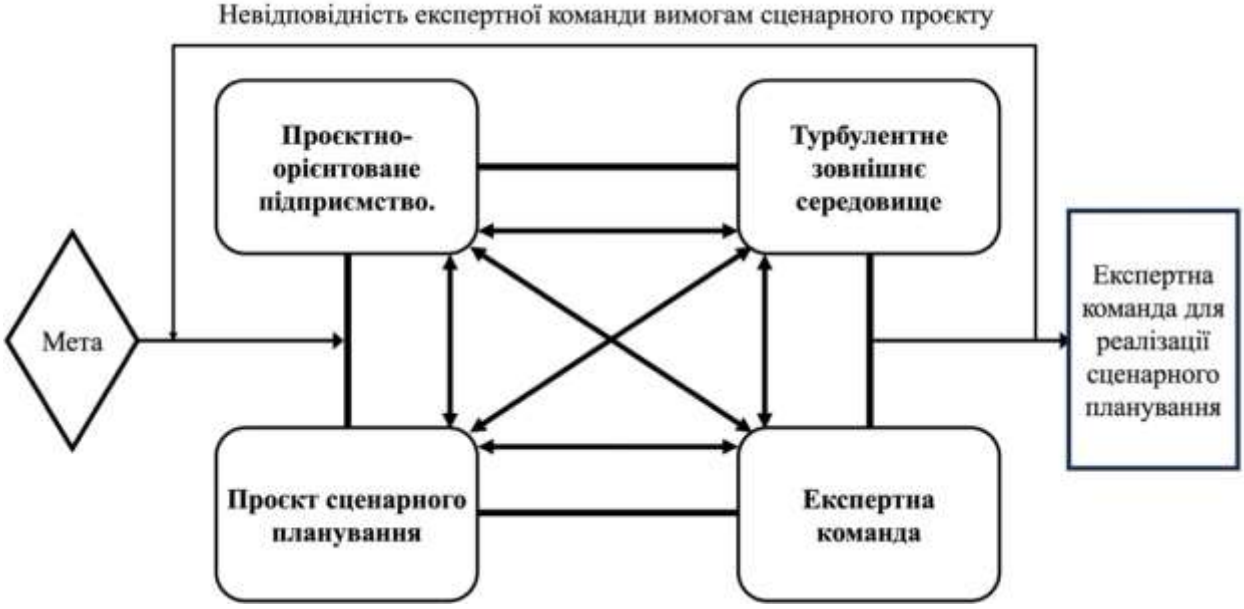



Рис. 1. Системна модель формування експертної команди для сценарного планування

Модель формування експертної команди для сценарного планування будується як задача багатокритеріального відбору, у якій кожен кандидат оцінюється за двома взаємопов’язаними блоками характеристик: hard skills і soft skills. Soft skills відображають якість колективного мислення в умовах невизначеності і включають самокритичність,

швидку адаптивність та кооперативність. Hard skills описують здатність формувати якісні сценарії та визначаються через набір змістовних компонентів, таких як, генерацію сценаріїв та глобальне бачення причинно-наслідкових зв'язків. Така структура дозволяє розглядати експертну команду не як сукупність окремих фахівців, а як систему, у якій індивідуальна професійна спроможність і командна поведінка разом визначають якість сценарного планування.

Команда трактується як система, у якій результат залежить від поєднання індивідуальних характеристик і парних ефектів взаємодії. Нехай $E=\{e_1,e_2,\ldots,e_n\}$ – множина кандидатів, $x_i\in\{0;1\}$ – змінна включення кандидата еі до команди. Для кожного кандидата задається вектор hard skills $h_i=(h_{i1},h_{i2},\ldots,h_{im})$, що може включати знання методів сценарного планування, проєктного менеджменту, доменну експертизу, системний аналіз, управління ризиками, роботу з даними та управління знаннями. Soft-вектор $e_i=(cr_i, a_i, cf_i, col_i, sc_i, ad_i)$ описує креативність, ставлення до експертизи, рівень конформізму, кооперативність, самокритичність та адаптивність. Для конформізму застосовується зворотне кодування, оскільки його надмірний рівень підвищує ризик групового мислення.

Для врахування надійності оцінювання вводиться показник достовірності експертних суджень $r_i = q_i/z_i$, де $q_i$ – кількість випадків, у яких рішення експерта було визнано практично прийнятним, $z_i$ – загальна кількість його долучень до експертиз. Крім того, формується матриця парної синергії $M = ||m_{ii}||$, де $m_{ii}\in[-1;1]$ характеризує, наскільки взаємодія кандидатів $e_i$ та $e_j$ посилює або послаблює якість сценарного мислення команди. Значення $m_{ii}$ може визначатися за результатами спільних кейс-завдань, історії попередньої роботи, взаємного оцінювання або експертної сесії.

Інтегральна ефективність складу команди пропонується визначати як

$$F(T)=\alpha H(T)+\beta S(T)+\gamma R(T)+\delta G(T),$$

де $H(T)$ – рівень покриття hard-компетенцій, $S(T)$ – якість soft-взаємодії, $R(T)$ – середня достовірність суджень, $G(T)$ – синергетичний ефект взаємодії експертів; $\alpha,\beta,\gamma,\delta$ – вагові коефіцієнти.

Командна синергія може бути подана як

$$G(T) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j>1}^{n} x_i x_j m_{ij},$$

а розмір команди визначається обмеженням $kmin\leq\Sigma x_i\leq kmax$. Додатково задаються пороги покриття компетенцій $\Sigma x_i\, h_{ii}\geq H_{jmin}$ та мінімальні значення soft-параметрів. Це дає змогу формувати не просто рейтинг окремих експертів, а оптимальну командну конфігурацію.

Алгоритм реалізації моделі передбачає: формування пулу кандидатів; визначення hard- і soft-параметрів для конкретного сценарного проєкту; нормування оцінок до єдиної шкали; розрахунок достовірності суджень; побудову матриці парної синергії; перебір або оптимізацію допустимих складів команди для кожного значення k; вибір складу з максимальним значенням $F(T)$ за дотримання встановлених обмежень.

**Висновки.** Запропоновано модель формування експертної команди для сценарного планування, яка поєднує професійні компетентності, поведінкові характеристики, достовірність суджень і парну синергію між кандидатами. На відміну від підходів, що орієнтуються лише на індивідуальну кваліфікацію експертів, модель дозволяє оцінювати команду як цілісну систему.

## Список використаних джерел


1. Rach, V., Rossoshanskaya, O., & Medvedieva, O. (2023). Management of different nature projects in the mind-economy of the bani-world. Information Systems in Project and Program Management. Press of the Kharkiv National University of Radioelectronics. DOI: https://doi.org/10.30837/mmp.2023.290
2. Мушинський, О. Ю., Тимофєєва, К. В. (2025). Управління командною взаємодією в проєктах на основі моделей особистості. *Вчені записки Університету «КРОК»*, (4(80), 273–281. DOI: https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-80-273-281

# ПРОГНОЗУВАННЯ ОБ'ЄМІВ РЕГІОНАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ МОДЕЛЯМИ ЧАСОВИХ РЯДІВ

**Племенник Я.Ю.**
ТОВ «Оператор газотранспортної системи України», Київ, Україна

**Анотація.** Метою роботи є дослідження особливостей прогнозування добового споживання природного газу з різним часовим горизонтом і в залежності від ступеня кореляції показників споживання з середньобовою температурою повітря. Об'єктом дослідження є процеси регіонального споживання природного газу на основі даних газотранспортної системи України. Предмет дослідження – моделі та методи моделювання та прогнозування динаміки споживання природного газу на основі сучасних підходів, моделей і методів аналізу часових рядів. Основним завданням роботи є побудова адекватної математичної моделі, використання якої дозволяє отримувати достатньо стабільні прогнози об'ємів споживання природного газу для мінімальних корекцій режимів впродовж дня і відповідно стабільної роботи газотранспортної системи в цілому. В матеріалах роботи наводяться результати прогнозування об'єму споживання природного газу в тисячах кубічних метрів як для окремих областей, так і для України в цілому у період з 1 січня 2026 року по 20 березня 2026 року і спосіб практичного впровадження отриманої моделі у робочі сервіси компанії «Оператор газотранспортної системи України». Отриманий прогноз дає змогу спеціалістам із режимних відділів орієнтуватися на отримані дані для оптимізації режиму управління окремими вузлами системи. Впродовж вищевказаного періоду було проведено порівняння значень, отриманих в результаті використання прогнозів моделі з фактичними обсягами споживання цільового об'єкта у відповідний день.

**Ключові слова:** газотранспортна система України, вузол газотранспортної системи, прогнозна математична модель, модель часового ряду, інтеграція прогнозних моделей в робоче середовище.

# FORECASTING REGIONAL NATURAL GAS CONSUMPTION VOLUMES USING TIME SERIES MODELS

**Plemennyk Y.**
LLC «Gas Transmission System Operator of Ukraine», Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The aim of the study is to investigate the features of forecasting daily natural gas consumption with different forecasting horizons and depending on the degree of correlation between consumption indicators and the average daily air temperature. The object of the study is the processes of regional natural gas consumption based on data from the gas transmission system of Ukraine, while the subject of the study is models and methods for modeling and forecasting the dynamics of natural gas consumption based on modern approaches, models, and methods of time series analysis. The main objective of the work is to develop an adequate mathematical model whose application makes it possible to obtain sufficiently stable forecasts of natural gas consumption volumes for minimal adjustments of operating modes during the day and, accordingly, to ensure the stable operation of the gas transmission system as a whole. The materials of the study present the results of forecasting natural gas consumption volumes, measured in thousands of cubic meters, both for individual regions and for Ukraine as a whole, for the period from January 1, 2026, to April 15, 2026, as well as a method for the practical implementation of the obtained model into the operational services of the Gas Transmission System Operator of Ukraine. The obtained forecast enables specialists from dispatching departments to rely on the generated data to optimize the operating modes of individual system nodes. During the above-mentioned period, a comparison was carried out between the values obtained using the model's forecasts and the actual consumption volumes of the target object on the corresponding day.

**Keywords**: Gas Transmission System of Ukraine, gas transmission system node, predictive mathematical model, time series model, integration of forecasting models into the operational environment.

**Вступ.** Українська газотранспортна система інфраструктурно є однією з найскладніших за кількістю і різноманіттям вузлів та їх топологією. Також вона є однією з найдовших у Європі як загалом, так і за протяжністю газопроводів відводів [1]. Велика

сумарна протяжність газопроводів відводів свідчить про велику кількість кінцевих споживачів, якими є газорозподільні станції і окремі об'єкти промисловості. Математичне прогнозування добового регіонального споживання природного газу є особливо актуальним станом на зараз, враховуючи, що корекція неправильних прогнозів коштує чимало часу працівникам різних управлінь дирекції диспетчеризації. Відповідно, їм доводиться виконувати більше дій як на оперативному (зайві переключення кранів тут і зараз), так і загальнорежимному (зміна режимів роботи компресорних станцій і режимів роботи регуляторів на різних ділянках лінійної частини) рівнях, кожна з яких забирає як час, так і гроші. Враховуючи періодичні обстріли компресорних станцій і пошкодження їх окремих цехів або газоперекачувальних апаратів і те, що загальний ефект посилюється і у зв'язку з тим, що набір складнощів, які з'являються час від часу не є детермінованим, то проблема має накопичувальний ефект [1]. Тому створення адаптивної моделі прогнозування добового регіонального споживання природного газу в складних недетермінованих умовах є актуальної науково-практичною задачею.

**Метою роботи** є дослідження особливостей добового споживання природного газу з різним часовим горизонтом і в залежності від ступеня кореляції показників споживання з середньобовою температурою повітря та побудова адаптивної моделі прогнозування динаміки споживання природного газу на основі аналізу часових рядів.

**Постановка задачі.** Як відомо, температура повітря змінюється кожного дня, як і ступінь кореляції між нею і споживанням природного газу у відповідному регіоні. Інерція збільшення та інерція зменшення об'ємів споживання природного газу в залежності від температури повітря теж мають різний характер проявлення, що залежить як від сезону (опалювальний, неопалювальний; окремі відрізки опалювального сезону) так і від регіону, і навіть від року. Взявши це до уваги, постає необхідність у створенні адаптивної моделі часових рядів для прогнозування спожитого об'єму природного газу за актуальну добу і на 3 дні вперед у обраному регіоні з автоматичним розрахунком та його корекцією по ходу дня, враховуючи, що дані за минулу добу можуть прийти не одразу або бути не повними. Отримані результати мають бути доступними для працівників, які встановлюють загальні режими роботи всієї газотранспортної системи в залежності від об'ємів споживання і стану системи в цілому. Точність результату буде вимірюватися у відносній відсотковій похибці, середня бажана точність якої не має перевищувати одного відсотка.

**Вирішення проблеми**. За базову прогнозну модель для розрахунків було обрано модель авторегресійного ковзного середнього з екзогенною змінною (ARIMAX) [2], що належить до класу state space моделей з фільтром Калмана, який і є реалізацією концепції прихованого стану для моделей часових рядів. Вона поєднує переваги рекурентних нейромереж з прихованим станом [3] і звичайних авторегресійних моделей. За рахунок своєї лінійності (на відміну від рекурентних нейромереж, що значно спрощує і підвищує швидкість процесу оптимізації [4]) і оптимізації методом максимальної правдоподібності (принаймні у реалізації statsmodels бібліотеки Python) час процесу навчання для кожного окремого ряду (приблизно 1500 спостережень) вимірюється в сотих секунди. Це дозволяє швидко перенавчати модель кожного дня для всіх об'єктів одразу (близько 1500 газорозподільних станцій), при цьому загальний час навчання і отримання результатів займає близько 5-10 хвилин. Фільтр Калмана, у свою чергу, не дає втратити загальну динаміку цільової змінної ряду, таким чином вирішуючи проблему стандартної авторегресії, коли за однакових попередніх значень температури і споживання за декілька минулих днів, і прогнозу погоди на необхідну кількість наступних днів, значення прогнозу в різні роки, чи в різні періоди (фази) одного опалювального сезону можуть суттєво відрізнятися. Модель ARIMAX дає умовно оптимальний компроміс між швидкістю навчання (для перерахунку прогнозів кожного дня і по декілька разів на день) і стійкістю до викидів.

Процес періодичного перерахунку прогнозних значень реалізовано, як модуль програми «Планувальник задач» на одному з серверів компанії. Модуль послідовно розв'язує чотири задачі:

1. Завантаження актуальних значень прогнозу температури повітря станом на зараз і на 3 дні вперед.

2. Завантаження актуальних (зазвичай за минулу добу) даних про споживання природного газу всіх областей (або газорозподільних станцій).

3. Розрахунок прогнозних значень на поточну дату і 3 наступних дні, де у кожного ряду значень споживання в певній області є відповідний для неї ряд температур по певній газорозподільній станції (зазвичай тій, яка прив'язана до обласного центру, оскільки вони (обласні центри) у більшості випадків дають суттєву частку погодозалежного споживання області). Для відповідних кожній області рядів: ряду об'ємів споживання природного газу і ряду середньодобової температури повітря з прогнозом середньодобової температури повітря на наступні 4 дні застосовується перенавчання моделі ARIMAX і розрахунок 4 значень, де кожне наступне передбачення робиться на основі попереднього. Тому зі збільшенням горизонту прогнозування буде падати й точність самого прогнозу. Запис отриманих значень у .xlsx файл (для більш наочного ретроспективного аналізу результатів моделі через певний період часу і більшої наочності отриманих результатів у порівнянні з постійними запитами до Oracle).

4. Запис нових отриманих результатів у базу даних.

Розроблений модуль відповідно складається з 4 скриптів, написаних мовою програмування Python з використанням допоміжних бібліотек (Numpy, Pandas (для роботи з табличними даними), Openpyxl (для автоматизації роботи з .xlsx файлами на рівні окремих книг (файлів), листів і окремих клітинок та їх значень і властивостей форматування), Oracledb (для роботи з базами даних Oracle)).

Працівники, яким необхідна дана інформація, отримують її через клієнт відповідної бази даних з графічним інтерфейсом і формами (графічними представленнями (view) окремих даних і вбудованих на сторінку документами) ОАСГТП (Обліково-Аналітична Система Газотранспортного Підприємства), де запити і оновлення їх результатів, виконуються натисканням на мишку, клавіатуру або відповідні елементи графічного інтерфейсу.

На рисунках 1 і 2 продемонстровано відповідність розрахованих прогнозів з фактичними даними для деяких вузлів обліку. На кожному з рисунків представлено 4 графіки: порівняння для поточного дня і 3 наступних впродовж періоду з 1 січня 2026 року по 20 березня 2026 року.

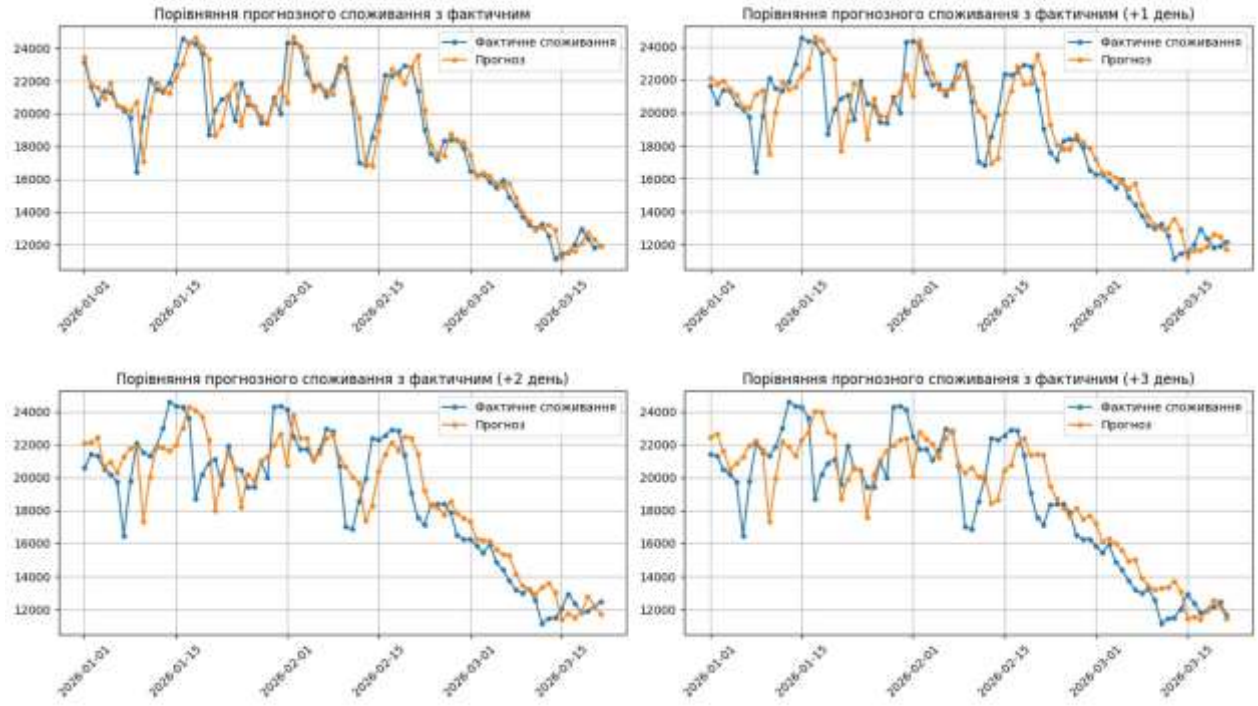



Рис. 1. Співставлення фактичних і модельних даних у залежності від широту горизонту прогнозування для Київської області

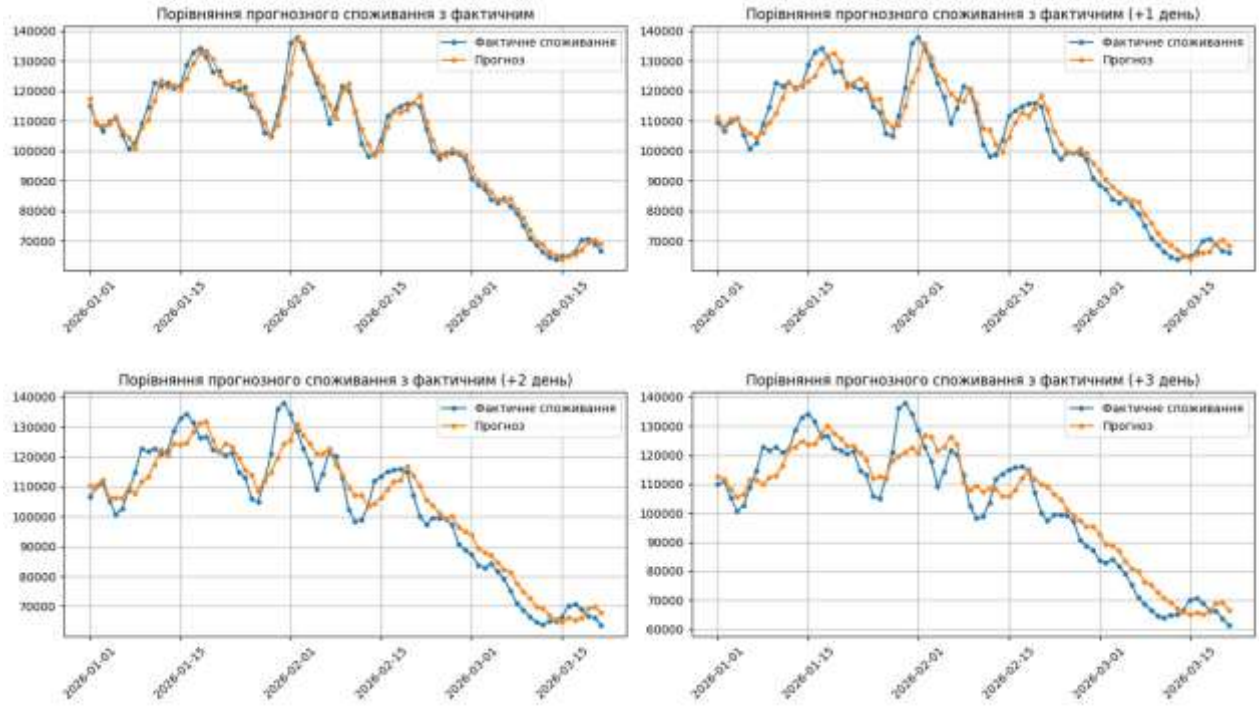



Рис. 2. Співставлення фактичних і модельних даних в залежності від широти горизонту прогнозування для України загалом

**Висновки**. У ході дослідження було проведено аналіз різних підходів до моделей прогнозування в контексті об'ємів споживання природного газу і запропоновано адаптивну модель прогнозування, виходячи з заданих обмежень обчислювальної спроможності корпоративної техніки і вимог щодо частоти оновлення і уточнення прогнозу. Цільових значень метрики точності (1% похибки) не було у повній мірі досягнуто (в середньому по Україні похибка становить 2-4%), проте отримані результати перевищують результати прототипної статичної та неадаптивної моделі. Повному виконанню задачі заважають обставини непереборної сили, оскільки обстріли вузлів управління режимом, які спричиняють ситуації коли реальне споживання значно менше спрогнозованого, оскільки пошкоджений вузол не здатен працювати на повну потужність до його повного відновлення, або до повної компенсації його обсягу роботи іншим апаратом частково пошкодженого вузла. За останні роки загальний профіль споживання газу в цілому став більш хаотичним. Ключем до вирішення даних проблем може стати додавання деяких категоріальних змінних та зміна принципів і критеріїв для побудови ієрархічної кластеризації географічних осередків у залежності від їх місця у газотранспортній системі або, навіть, у газорозподільній системі.

## Список використаних джерел


1. Сайт компанії «Оператор ГТС України». URL: https://tsoua.com/ (дата звернення: 03.05.2026).
2. Uyodhu Amekauma Victor-Edema, Isaac Didi Essi. Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variable (ARIMAX) Model for Nigerian Non Oil Export / *European Journal of Business and Management.* ISSN 2222-1905 (Paper). ISSN 2222-2839 (Online). Vol.8, No.36, 2016. P. 29-34. URL: https://scispace.com/pdf/autoregressive-integrated-moving-average-with-exogenous-1xmeug3fgf.pdf (дата звернення: 03.05.2026).
3. Xiangjie Kong, Zhenghao Chen, Weiyao Liu, Kaili Ning, Lechao Zhang, Syauqie Muhammad Marier, Yichen Liu, Yuhao Chen, Feng Xia. Deep Learning for Time Series Forecasting: A Survey. 2025. 60 p. URL: https://arxiv.org/pdf/2503.10198.
4. Brykin D. Sales Forecasting Models: Comparison between ARIMA, LSTM and Prophet. Journal of Computer Science. 2024. URL: https://thescipub.com/pdf/jcssp.2024.1222.1230.pdf (дата звернення: 03.05.2026).

# МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У МУЛЬТИПРОЄКТНОМУ ІТ-СЕРЕДОВИЩІ В УМОВАХ BANI

**Попов В.В.**
Черкаський державний технологічний університет

**Анотація**. У роботі досліджуються сучасні підходи до прийняття управлінських рішень у мультипроєктному ІТ-середовищі в умовах BANI (Brittle, Anxious, Non-linear, Incomprehensible). Метою дослідження є аналіз існуючих моделей адаптивного управління портфелями проєктів та визначення основних напрямів їх розвитку. Об'єктом дослідження є процес управління портфелем проєктів, а предметом – методи підтримки прийняття рішень в умовах BANI. У роботі використано методи аналізу наукових джерел, порівняння та узагальнення сучасних підходів. Результати дослідження показали, що сучасні моделі управління проєктами у мультипроєктному ІТ-середовищі базуються на інтеграції штучного інтелекту, цифрових двійників, предиктивної аналітики та механізмів зворотного зв'язку. Встановлено, що основною тенденцією є перехід від статичних до адаптивних моделей управління, однак питання формалізації процесу прийняття управлінських рішень у мультипроєктному ІТ-середовищі в умовах BANI залишається недостатньо дослідженим.

**Ключові слова**: мультипроєктне середовище, BANI, управління портфелем проєктів, прийняття рішень, штучний інтелект.

# DECISION-MAKING MODELS IN A MULTI-PROJECT IT ENVIRONMENT UNDER BANI CONDITIONS

**Popov V.V.**
Cherkasy State Technological University

**Abstract**. The paper examines modern approaches to decision-making in a multi-project IT environment under BANI conditions (Brittle, Anxious, Non-linear, Incomprehensible). The aim of the study is to analyze existing adaptive project portfolio management models and identify their development directions. The object of the study is project portfolio management processes, while the subject is decision support methods under uncertainty. The research methods include literature analysis, comparison, and generalization of modern approaches. The results show that current models are based on artificial intelligence, digital twins, predictive analytics, and feedback mechanisms. It is established that a key trend is the transition from static to adaptive management models, while formalization of decision-making processes remains insufficiently developed.

**Keywords**: multi-project environment, BANI, project portfolio management, decision-making, artificial intelligence.

**Вступ**. Сучасні організації, зокрема ІТ-компанії, функціонують у середовищі, яке дедалі частіше описується через концепцію BANI, що відображає крихкість систем, високий рівень тривожності, нелінійність процесів та складність інтерпретації інформації [1]. У таких умовах традиційні підходи до управління портфелями проєктів, що базуються на детермінованому плануванні, втрачають ефективність і не забезпечують необхідної гнучкості управління.

**Мета роботи**. Метою роботи є аналіз сучасних наукових підходів до прийняття рішень у мультипроєктному середовищі в умовах BANI та визначення основних напрямів їх розвитку.

**Постановка задачі**. У сучасних дослідженнях з управління портфелями проєктів в умовах BANI основною проблемою є недостатня розробленість ефективних моделей прийняття рішень, які б враховували динамічний характер мультипроєктного середовища та високий рівень невизначеності. Існуючі підходи для вирішення цієї проблеми переважно орієнтовані на аналіз даних або оптимізацію ресурсів, але вони не забезпечують цілісного механізму підтримки прийняття управлінських рішень.

**Вирішення проблеми.** Аналіз сучасних досліджень показує, що одним із ключових напрямів розвитку сучасних наукових підходів до прийняття рішень у мультипроєктному

середовищі в умовах BANI є перехід до адаптивних моделей управління портфелями проєктів. Зокрема, у роботі Гоца та Веренич [2] запропоновано модель адаптивної реконфігурації портфеля проєктів (IDPR), яка базується на інтеграції штучного інтелекту та принципів кібернетичних систем. Модель включає блоки моніторингу, предиктивної аналітики, прийняття рішень та зворотного зв'язку, що дозволяє забезпечити безперервну адаптацію портфеля до змін зовнішнього середовища.

Важливим елементом сучасних підходів управління проєктами є використання штучного інтелекту для підтримки прийняття рішень. Як показано у роботі Duică [3], штучний інтелект (ШІ) дозволяє автоматизувати процеси планування, прогнозування ризиків та оптимізації ресурсів, що значно підвищує ефективність управління проєктами. Водночас автор підкреслює, що роль менеджера не зменшується, а трансформується у напрямі стратегічного управління та інтерпретації результатів.

Перспективним напрямом розвитку моделей прийняття рішень у проєктному та портфельному управлінні є поєднання алгоритмічних і людських підходів до прийняття рішень. Зокрема у дослідженні Cihan [4] обґрунтовується необхідність інтеграції data-driven та human-centric підходів, що дозволяє враховувати як об'єктивні дані, так і експертні знання та стратегічні цілі організації.

Окрему увагу у дослідженнях приділено впливу BANI-середовища на процеси управління. У роботі Bushuyev та ін. [1] показано, що традиційні підходи до оцінювання ризиків не враховують їх нелінійний характер, що потребує використання нових моделей, здатних працювати з динамічними та невизначеними параметрами.

Крім того, важливим компонентом ефективного управління є комунікація. Згідно з результатами дослідження Дяченка та Шадури [5], проактивна комунікація дозволяє зменшити рівень невизначеності, покращити взаємодію між стейкхолдерами та підвищити стійкість проєктних систем.

Додаткові дослідження, зокрема Kalathoti [6], демонструють ефективність адаптивних підходів, таких як використання цифрових двійників та сценарного моделювання, що дозволяє зменшити затримки у прийнятті рішень і підвищити точність прогнозування.

**Висновки**. Проведений аналіз показав, що сучасні підходи до управління мультипроєктними середовищами в умовах BANI спрямовані на формування адаптивних систем, які використовують штучний інтелект, предиктивну аналітику та механізми зворотного зв'язку. Основною тенденцією є перехід від статичних моделей до динамічних, здатних реагувати на зміни в реальному часі.

Водночас встановлено, що існуючі дослідження не забезпечують достатньої формалізації процесу прийняття управлінських рішень у мультипроєктному IT-середовищі в умовах BANI, зокрема побудові відповідних моделей, методів та інформаційних технологій, що відкриває перспективи для подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

## Список використаних джерел


1. Bushuyev S., Piliuhina A., Chetin M. Transformation of values of high-technology projects from VUCA to BANI environment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2023. № 24. С. 191–199. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.191.
2. Гоц В. В., Веренич О. В. Модель адаптивної реконфігурації портфеля проєктів у BANI-середовищі. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 64. С. 14–22. DOI: 10.32347/2412-9933.2025.64.14-22.
3. Duică M. C., Vasciuc C. G., Panagoreț D. The Use of Artificial Intelligence in Project Management. *Valahian Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 15(29), Issue 1. P. 105–117. DOI: 10.2478/vjes-2024-0009.
4. Cihan E. Future of project portfolio management: Bridging data-driven and human-centric approaches / The 13th IPMA Research Conference "Honoring 60 years of Project Management: Leading the Way into the Future". 2025. P.1-19. DOI: 10.56889/nxhl8876.
5. Дяченко П.В., Шадура Д.О., Модель проактивних комунікацій проєктів логістичних підприємств в умовах vuca-bani-світів. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 63. С. 62–69. DOI: 10.32347/2412-9933.2025.63.62-69.
6. Kalathoti R. Adaptive project management using digital twins. *International Journal of Research in Management and Business Studies*. 2025. Vol. 14. P. 11-19. DOI: 10.63345/ijrmp.v14.i8.2.

# ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА НА ЗАСАДАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Смерічевський С., Побережна З., Штик Ю.**
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

**Анотація**. Для сучасних підприємств формування системи економічної безпеки має ключове значення. Одночасно із цим також збільшується рівень різноманітних загроз на підприємство, що потребують використання сучасних інформаційних технологій. Це дозволяє забезпечити високий рівень інформаційного середовища, достовірності та моніторингу інформації, захисту даних, унеможливлює витік інформації та персональних даних. Тому метою цього дослідження є формування комплексної системи економічної безпеки для підвищення ефективності діяльності підприємства, зменшення та подолання загрозам що впливають на підприємство. В контексті дослідження пропонується модель інформаційного забезпечення системи економічної безпеки підприємства з використанням інформаційних технологій. Дана модель складається з окремих складових, що взаємопов'язані і функціонують в єдиному просторі і призначені для оперативної та регулярної передачі достовірних відомостей про процеси, що відбуваються у зовнішньому оточенні. Запропонована модель дозволяє захистити інформацію та інтелектуальну власність підприємства.

**Ключові слова**: інформаційне забезпечення, економічна безпека підприємства, інформаційні технології, захист інформації, загрози.

# FORMATION OF ENTERPRISE'S ECONOMIC SECURITY SYSTEM BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES

**Smerichevskyi S., Poberezhna Z., Shtyk Y.**
[1]State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, Ukraine

**Abstract**. For modern enterprises, the formation of an economic security system is of key importance. At the same time, the level of various threats to the enterprise is also increasing, requiring the use of modern information technologies. This allows to ensure a high level of information environment, reliability and monitoring of information, data protection, and prevents the leakage of information and personal data. Therefore, the purpose of this study is to form a comprehensive economic security system to increase the efficiency of the enterprise, reduce and overcome threats affecting the enterprise. In the context of the study, a model of information support for the economic security system of the enterprise using information technologies is proposed. This model consists of separate components that are interconnected and function in a single space and are designed for the prompt and regular transmission of reliable information about the processes occurring in the external environment. The proposed model allows to protect the information and intellectual property of the enterprise.

**Keywords**: Information Support, Economic Security of the Enterprise, Information Technologies, Information Protection, Threats.

**Вступ**. В умовах мінливого цифрового середовища зростає кількість загроз які безпосередньо впливають на рівень потенціалу підприємства, що включає його основні складові: фінансові, кадрові, організаційні, технологічні та інформаційні. В контексті цього, роль економічної безпеки набуває особливої актуальності. Постає необхідність розробки ефективної системи економічної безпеки, що дозволяє зберегти позиції підприємства на ринку і забезпечить сталий розвиток у майбутньому. Формування системи економічної безпеки підприємства дозволяє протистояти загрозам, їх попередженню, а також раціональному використанню ресурсів для ефективного функціонування та збільшення прибутку.

Підприємствам потрібно адаптуватися до таких умов і реалізувати політику, спрямовану на вдосконалення системи забезпечення їх економічної безпеки в умовах цифровізації бізнес-відносин [1-3]. Забезпечення економічної безпеки підприємства є процес реалізації функціональних складових безпеки з метою запобігання можливих збитків і досягнення максимального рівня економічної безпеки підприємства. Економічної безпеки

підприємства характеризується захищеністю від негативного впливу факторів, економічному розвитку та стабільності, ефективному використанню ресурсів, здатність запобігати негативному впливу факторів навколишнього середовища [4-7]. Для боротьби з впливом загроз на діяльність підприємства необхідно створити цілеспрямований процес протидії, що обійдеться підприємству набагато дешевше, ніж усунення загрози, яка вже виникла [8]. Одним з пріоритетних напрямків забезпечення економічної безпеки організації є впровадження інформаційних технологій, захист інформаційних ресурсів.

**Метою цього дослідження** є підвищення рівня економічної безпеки підприємства через використання інформаційних технологій.

**Постановка задачі**. Недостатній рівень інформації на підприємстві, її недостовірність, або вплив інформаційних загроз зменшують систему економічної безпеки підприємства. Саме тому, формування системи економічної безпеки потребує використання сучасних методів і модель інформаційного забезпечення, що підвищить рівень безпеки в цілому. З метою забезпечення відповідного рівня інформаційного середовища варто використовувати сучасні види інформаційних технологій, що дозволять зменшити вплив загроз, що включають як кібератаки, витік конфіденційної інформації, несанкціонований доступ, а також виявити приховані закономірності або аномалії, що свідчать про шахрайство або неправомірні дії персоналу. Застосування сучасних інформаційних інструментів дозволяють забезпечити автоматизацію діяльності, спростити певні операційні процеси, мінімізуючи вплив людського фактору та знижуючи ризики. Актуальність дослідження підсилюється тим, що існує нагальна проблема розробки сучасних моделей економічної безпеки з використанням інформаційних технологій, що дозволяє захищати інформацію, підвищувати рівень стійкості, забезпечувати ефективне управління, мінімізувати втрати і протистояти гібридним загрозам.

**Вирішення задачі**. Економічна безпека підприємства (ЕБП) характеризується спроможністю протистояти зовнішнім і внутрішнім загрозам. До зовнішніх загроз можна віднести: макроекономічні кризи, зміна законодавства і політичної ситуації в країні, недобросовісна конкуренція та ін. Внутрішні загрози пов'язані з внутрішньою сферою функціонування, що включає: технологічні і виробничі недоліки, зниження іміджу і ділової репутації, порушення режиму комерційної таємниці, погіршення відносин з зовнішніми суб'єктами, помилковий вибір мети, стратегічного планування, що знижують рівень економічної безпеки. Для ефективного функціонування підприємства необхідним є достатній рівень інформації для всіх підрозділів підприємства. Певні підрозділи і відділи мають конкретні функції, мету і завдання яких полягає в забезпеченні інформаційної безпеки підприємств. Інформаційне забезпечення підприємства є складовою економічної безпеки і потребує використання сучасних інформаційних технологій, таких як:

- ERP-системи (Enterprise Resource Planning), що інтегрують усі підрозділи в єдине інформаційне поле, що мінімізує внутрішні зловживання. Це унеможливлює приховування фінансових показників та створює «прозорість» усіх бізнес-процесів, що є критичним для протидії внутрішнім загрозам (корупція, крадіжки).

- Big Data та аналітика, що дозволяють прогнозувати ринкові ризики та зміни попиту. Це дозволяє виявляти аномалії в операційній діяльності, що можуть свідчити про шахрайство або неефективне використання ресурсів. Прогнозне моделювання допомагає оцінити наслідки управлінських рішень до їх реалізації.

- Хмарні технології, що забезпечують доступність даних та можливість швидкого відновлення бізнесу після збоїв.

- CRM-системи (Customer Relationship Management), що захищають клієнтську базу та допомагають контролювати роботу менеджерів.

Інформаційні технології сьогодні є не просто допоміжним інструментом, а базовим елементом формування системи економічної безпеки. Інтегровані IT-системи дозволяють створити комплексну оболонку захисту підприємства, яка охоплює фінансовий, кадровий та інформаційний рівні.

Розвиток інформаційних технологій впливають на технологічний розвиток підприємства в цілому, яке характеризується придбанням нових технологічних обладнань та використанню нових знань. В контексті цього, доцільно запропонувати модель комплексного інформаційного забезпечення системи економічної безпеки підприємства з використанням інформаційних технологій, наведену на рис.1.

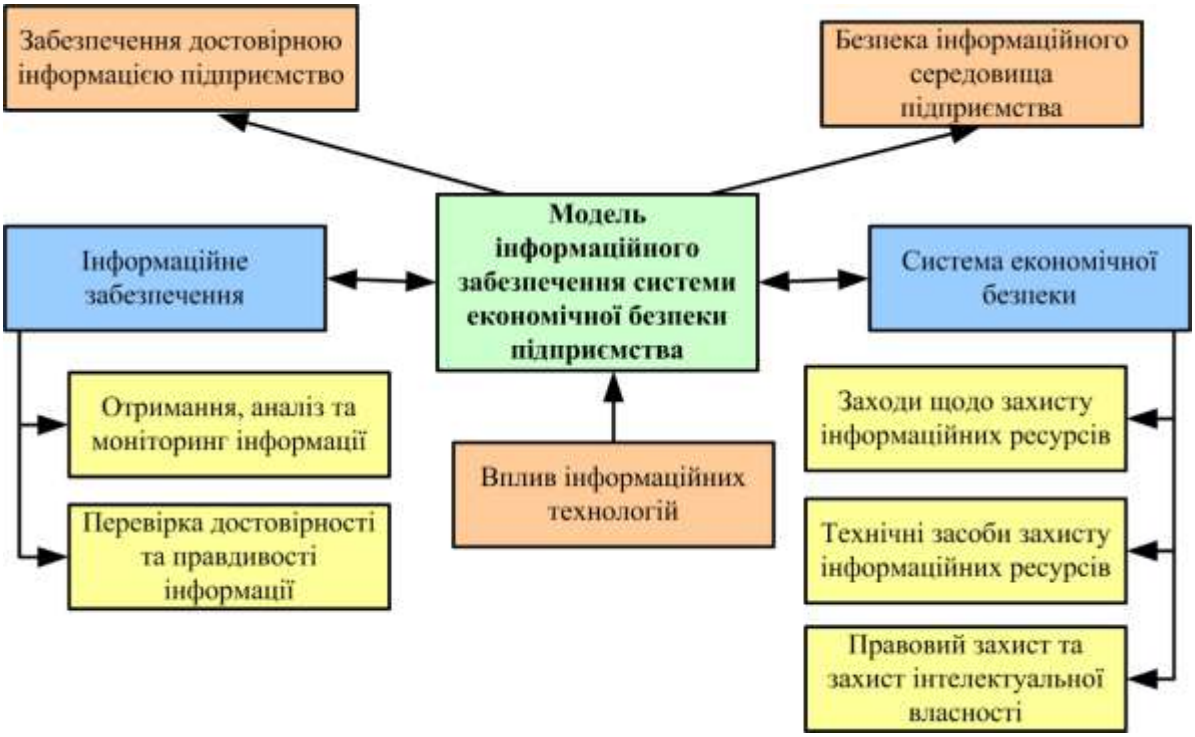



Рис. 1. Модель комплексного інформаційного забезпечення системи економічної безпеки підприємства з використанням інформаційних технологій

Ефективність запропонованої моделі підвищується, якщо кожна ланка в ній буде розглядатися як окремий процес, складові моделі взаємопов'язані і функціонують в єдиному просторі. Першою складовою є забезпечення інформаційної підтримки, що призначена для оперативної та регулярної передачі достовірних відомостей про процеси, що відбуваються у зовнішньому оточенні. Це зазвичай впливає на роботу підприємства та рівень його економічної безпеки. Запропоновані складові дозволяють захистити інформацію та інтелектуальну власність підприємства.

Для підвищення рівня економічної безпеки необхідним є інформаційне забезпечення всіх підрозділів, що здатне реагувати на зміни зовнішнього і внутрішнього середовища.

Інформаційні технології дозволяють підвищити рівень економічної безпеки підприємства, забезпечити ефективність, своєчасне отримання, обробку, передачу інформації [9]. Серед способів підвищення економічної безпеки підприємств варто зазначити, підвищення рівня інноваційного розвитку, використання програмного забезпечення для захисту програмних засобів від вірусів, раціональне ресурсів, впровадження прогресивних технологій, автоматизація виробництва [10, 11].

Роль інформаційних технологій на підприємстві в системі забезпечення ЕБТ відіграє ключову роль, оскільки підвищує ефективність бізнес-процесів, якість продукції і рівень прийнятих рішень. З метою підвищення ЕБП слід застосовувати інформаційні технології, які дають можливість обліку техніко-технологічних, ресурсних, комунікаційних та інших показників, що може відображатись програмним забезпеченням. Головним індикатором рівня ЕБТ є оцінка його стану в цілому, що може використовувати різні методики для оцінки рівня ЕБП. На основі отриманого результату можна приймати рішення про підвищення фактичного значення, що впливає на систему забезпечення ЕБП. Управління економічною

безпекою залежать від сфери діяльності, наявних ресурсів та стратегічного бачення розвитку підприємства у довгостроковій перспективі [12]. Встановлено, що модель економічної безпеки підприємства залежить від галузевої специфіки, розміру підприємства, фінансового стану, рівня цифровізації та стратегічних цілей розвитку [13].

Таким чином, розвиток інформаційних технологій дозволяє автоматизувати процеси на підприємстві через впровадження відповідних програм та цифрових продуктів, сприяє ефективному використанню ресурсів, зменшуючи вплив людського фактору. А той вид інформації, що потребує розсилки співробітникам надається достовірно і швидко.

**Висновки**. Таким чином, виявлено важливість та необхідність застосування та впровадження інформаційних технологій у забезпеченні економічної безпеки підприємства. Технологічний прогрес, розвиток цифрових технологій створюють загрози для підприємств, що потребує захисту в мінливому середовищі. Сучасні інформаційні технології дозволяють автоматизувати управління підприємством, систематизувати свою діяльність, планувати нові операційні процеси, підвищувати ефективність всіх підрозділів та всього персоналу. Це дозволяє впровадити систему захисту та безпеки, що здатна захищати наявні ресурси та сформувати інноваційне зростання в умовах невизначеності та гібридних загроз.

## References


1. Любохинець Л. С., Лісовськии І. В. Формування системи економічної безпеки підприємства в умовах цифровізації бізнес-відносин. Український журнал прикладної економіки та техніки 7 (4), 16-24 (2022).
2. Iershova, N., Garkusha, V. (2021). Functioning of the system of ensuring the economic security of the industrial enterprise: conceptual provisions. Economics and Education 6(2), 37-42 (2021). https://doi.org/10.30525/2500-946X/2021-2-6
3. Shynkar, S., Gontar, Z., Dubyna, M., Nasypaiko, D., Fleychuk, M. Assessment of economic security of enterprises: theoretical and methodological aspects. Business: Theory and Practice 21(1), 261-271 (2020). https://doi.org/10.3846/btp.2020.11573
4. Kovalska, L., Holii, O., Holii, V. Economic security of the enterprise: The essence, structure and mechanism of ensuring. Economic Forum 13(1), 126-137 (2023). https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2023-1-16
5. Britchenko, I., Bohomolova, N., Kravchenko, O., Pinchuk, S. Assessment of the determinats of financial security ofrailways in Ukraine. Financial and credit activity: Problems ofTheory and Practice 4(27), 270–281 (2018). https://doi.org/10.18371/fcaptp.v4i27.154109
6. Sylkin, O., Kryshtanovych, M., Zachepa, A., Bilous, S., Krasko, A. Modeling the process of applying anti-crisis management in the system of ensuring financial security ofthe enterprise. Business: Theory and Practice 20, 446–455 (2019). https://doi.org/10.3846/btp.2019.41
7. Wu, Y., Meng, F. Categorizing security for security management and information resource management. Journalof Strategic Security 11(4), 72–84 (2019). https://doi.org/10.5038/1944-0472.11.4.1694
8. Zahorodnia A.S., Fedorenko T.V. Economic security of the enterprise: modern challenges and threats. Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management*:* Electronic scientific and practical journal 26, 75-79 (2024). https://doi.org/10.46783/smart-scm/2024-26-6
9. Неустроєв Ю.Г. Роль інформаційних технологій у забезпеченні економічної безпеки країни. Інвестиції: практика та досвід 8, 40–44 (2021). https://doi.org/10.32702/23066814.2021.8.40
10. Огренич Ю. О. Інформаційні технології як передумова поліпшення стану економічної безпеки промислових підприємств в умовах негативного впливу чинників ринкового середовища. Науковий вісник Ужгородського національного університету: серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство 41, 79–85 (2022). https://doi.org/10.32782/2413-9971/2022-41-14
11. Мачак Т., Дубина О., Юрченко С. Інформаційне забезпечення управління системою економічної безпеки підприємства та його удосконалення. Економіка та суспільство, 61 (2024). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-66
12. Blynkov V. Cybersecurity as a Key Element of Economic Security in the it Sector. Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management, 20 (2025). https://doi.org/10.54929/2786-5738-2025-20-03-01
13. Plekan V. Accounting and Analytical Support for Ensuring Enterprise Economic Security. Herald of Economics 1, 179-88 (2026). https://doi.org/10.35774/visnyk2026.01.179.

# КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЗМІСТОМ ІТ-ПРОЄКТІВ В УМОВАХ ВІДДАЛЕНОЇ РОБОТИ КОМАНД У СПІЛЬНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

**Ткаченко Є.В., Триус Ю.В.**
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі розглянуто проблему управління змістом ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи команд. Обґрунтовано, що в практиці ІТ-проєктів на вхід процесу управління змістом надходять не лише готові до реалізації вимоги, а й проблеми, ідеї, потреби, припущення та запити на зміни, які мають різний рівень визначеності. Запропоновано концептуальну модель, яка передбачає структурування вхідних елементів змісту, визначення подальшого напряму їх опрацювання та розмежування контурів дослідження і реалізації. Для опрацювання недостатньо визначених елементів змісту запропоновано використовувати методи дизайн-мислення. Особливістю моделі є використання спільного інформаційного середовища для збереження контексту прийняття рішень, зв'язків між елементами змісту та історії їх змін. Модель спрямована на зменшення ризику передчасної реалізації недостатньо обґрунтованих рішень і підтримку узгодженої роботи віддаленої команди.

**Ключові слова:** ІТ-проєкт, управління змістом, віддалена робота, концептуальна модель, дизайн-мислення, вимоги.

# CONCEPTUAL MODEL FOR IT-PROJECT SCOPE MANAGEMENT IN CONDITIONS OF REMOTE WORK IN SHARED INFORMATION ENVIRONMENT

**Tkachenko Ye., Tryus Yu.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper considers the problem of IT project scope management in remote work conditions. It is substantiated that in the practice of IT projects, a team receives not only requirements that are ready for implementation, but also problems, ideas, needs, assumptions, and change requests that have different levels of definition. A conceptual model is proposed that provides for structuring incoming scope elements, determining the further direction of their processing, and separating the research and implementation loops. To process insufficiently defined scope elements, the use of design thinking methods is proposed. A distinctive feature of the model is the use of a shared information environment to preserve the context of decision-making, the relationships between scope elements, and the history of their changes. The model is aimed at reducing the risk of premature implementation of insufficiently justified solutions and supporting the coordinated work of a remote team.

**Keywords:** IT project, scope management, remote work, conceptual model, design thinking, requirements.

**Вступ.** Управління змістом ІТ-проєкту є одним з важливих напрямів проєктного управління, оскільки воно визначає межі проєкту, склад необхідних робіт і безпосередньо впливає на відповідність результату очікуванням зацікавлених сторін [1]. Чітке визначення змісту дає змогу планувати строки, ресурси й склад робіт, тоді як його недостатня визначеність підвищує ризик непорозумінь, переробок і розширення проєкту.

У практиці ІТ-проєктів зміст формується не лише через готові вимоги. На вхід команди часто надходять проблеми користувачів, ідеї стейкхолдерів, побажання, гіпотези та нечіткі запити, для яких ще не визначено обґрунтоване рішення. Якщо такі елементи передаються в реалізацію без попереднього уточнення, команда може витрачати ресурси на створення функцій, що не вирішують початкову проблему або не створюють очікуваної цінності.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах віддаленої роботи команд. За такої організації взаємодії значна частина комунікації відбувається через цифрові канали, а контекст рішень часто розподілений між чатами, документами, прототипами, задачами та результатами обговорень. Це ускладнює узгодження розуміння між учасниками команди та

підвищує вимоги до формалізації змісту, збереження контексту й прозорості прийнятих рішень [2].

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення концептуальної моделі управління змістом ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи команд, яка забезпечує структуроване опрацювання елементів змісту залежно від рівня їх визначеності та підтримує збереження контексту рішень у спільному інформаційному середовищі.

**Постановка задачі.** Однією з проблем управління змістом ІТ-проєкту є те, що різні за рівнем визначеності елементи часто потрапляють в один загальний потік роботи. Унаслідок цього команда може передчасно переходити до реалізації рішень, які ще не були достатньо обґрунтовані.

Для подолання цієї проблеми необхідно відокремити опрацювання недостатньо визначених елементів змісту від реалізації вже підготовлених вимог і рішень. Такий підхід узгоджується з ідеєю розмежування дослідницької та реалізаційної діяльності, що застосовується в сучасних гнучких підходах до розроблення програмного забезпечення , таких як Dual Track Agile [3, 4]. У межах цієї роботи зазначене розмежування розглядається не як окрема методологія розроблення продукту, а як принцип організації управління змістом ІТ-проєкту.

У зв’язку з цим, виникає задача побудови концептуальної моделі, яка забезпечує первинне оцінювання елементів змісту, визначення напряму їх подальшого опрацювання та збереження контексту рішень у спільному інформаційному середовищі.

**Основна частина.** У роботі запропоновано концептуальну модель управління змістом ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи команд, яка передбачає розмежування процесів уточнення змісту та реалізації. Основною ідеєю моделі є формалізація переходу від нечітких вхідних елементів, таких як проблеми, ідеї, потреби, припущення або запити на зміни, до підготовлених вимог, задач і рішень, що можуть бути передані в реалізацію. Структуру запропонованої концептуальної моделі подано на рис. 1.

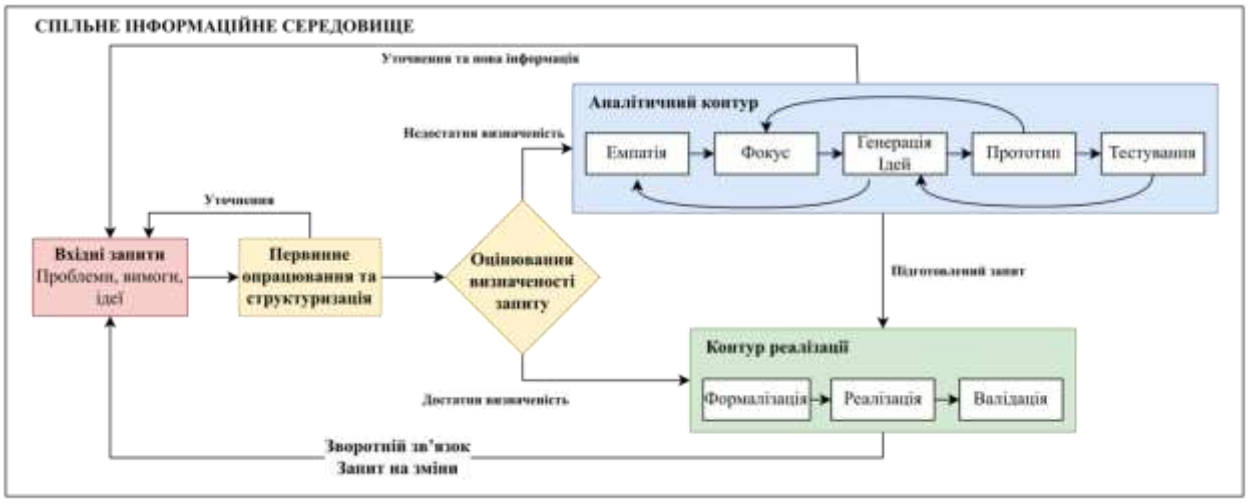



Рис 1. Концептуальна модель управління змістом ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи команд у спільному інформаційному середовищі

У межах моделі вхідні елементи змісту спочатку фіксуються та структуруються. Після цього визначається їх готовність до подальшої роботи: елементи, що мають достатній рівень визначеності, передаються до контуру реалізації, а ті, що потребують додаткового уточнення, спрямовуються до контуру дослідження. Такий поділ дозволяє не змішувати в одному потоці готові до виконання вимоги та запити, для яких ще потрібно уточнити проблему, очікуваний результат або спосіб вирішення.

Контур дослідження призначений для опрацювання недостатньо визначених елементів змісту до їх передачі в реалізацію. У цьому контурі можуть застосовуватися методи дизайн-

мислення, зокрема уточнення проблеми, аналіз потреб користувачів і стейкхолдерів, формування гіпотез, створення прототипів та перевірка запропонованих рішень [5]. Результатом такого опрацювання є уточнений елемент змісту: сформульована вимога, описане рішення, прототип, критерії прийняття або рішення про недоцільність реалізації.

Контур реалізації забезпечує перетворення підготовлених елементів змісту на конкретні задачі, роботи та результати ІТ-проєкту. До реалізації передається не лише опис задачі, а й контекст її появи та уточнення, що зменшує ризик втрати змісту рішення під час переходу від аналізу до виконання.

Для підтримки віддаленої роботи всі етапи моделі виконуються у спільному інформаційному середовищі. У ньому зберігаються вхідні елементи змісту, результати їх структурування, гіпотези, прототипи, рішення, вимоги, задачі, коментарі, результати перевірки та історія змін. Таке середовище забезпечує доступність контексту для всіх учасників команди та зменшує ризик втрати інформації під час асинхронної взаємодії.

Завершальним елементом моделі є механізм зворотного зв’язку. Після реалізації рішення результати його використання або перевірки можуть бути повернуті до процесу управління змістом. Якщо виявлено нові проблеми, зміну очікувань або обмежену користь створеного рішення, відповідний елемент змісту повторно спрямовується на уточнення. Завдяки цьому модель підтримує ітеративне опрацювання змісту ІТ-проєкту.

**Висновок.** У роботі запропоновано концептуальну модель управління змістом ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи команд, яка передбачає розмежування процесів дослідження та реалізації елементів змісту. Запропонована модель дозволяє структурувати роботу з різними за рівнем визначеності запитами та формалізувати перехід від нечіткого запиту до підготовленої задачі або рішення.

Використання спільного інформаційного середовища забезпечує збереження контексту прийняття рішень, зв’язок між проблемами, вимогами, задачами та результатами їх перевірки, що є важливим для віддаленої взаємодії команди. Запропонована модель може бути використана як основа для розроблення інформаційної технології підтримки управління змістом ІТ-проєктів, а подальші дослідження можуть бути спрямовані на формалізацію критеріїв готовності елементів змісту до реалізації та побудову відповідної математичної моделі.

## Список використаних джерел


1. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 6th ed. 2017. P. 30.
2. Триус Ю. В., Ткаченко Є. В. Особливості управління командою ІТ-проєкту в умовах віддаленої роботи. Управління розвитком складних систем, (60), 105–112. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.105-112.
3. Trieflinger S., Münch J., Heisler B., Lang D. Essential Approaches to Dual-Track Agile: Results from a Grey Literature Review. In: International Conference on Software and Systems Process. 2020.
4. Patton J. Dual Track Development is not Duel Track. Jeff Patton & Associates. 2017. URL: https://jpattonassociates.com/dual-track-development/
5. Parizi R., Prestes M., Marczak S., Conte T. How has design thinking being used and integrated into software development activities? A systematic mapping // Journal of Systems and Software. 2022. Vol. 187. Article 111217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111217.

# МЕТОДИ КОЛЕКТИВНОГО ІНТЕЛЕКТУ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ З ОБМЕЖЕНИМИ РЕСУРСАМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ

**Федоренко В.С., Триус Ю.В.**
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

**Анотація**. Управління сучасними ІТ-проєктами вимагає розв'язання складних оптимізаційних задач, оскільки наявність обмежених ресурсів, різноманітних навичок розробників та альтернативних режимів виконання робіт суттєво ускладнює календарне планування. Робота присвячена дослідженню задачі календарного планування з обмеженими ресурсами (RCPSP) та її варіацій. Через *NP*-складність цих математичних моделей класичні точні методи їх розв'язання є неефективними для реальних масштабів. Головним фокусом дослідження є застосування методів колективного (ройового) інтелекту та еволюційного моделювання, таких як квантовий метод рою часток (HQPSO), комбінаторні алгоритми (CABFIA), покращений алгоритм газелі (GOAIP), гібридний мурашиний алгоритм (HACO), двофазний генетичний алгоритм (2PGA), гібридний алгоритм навчання (HGA), а також новітні підходи: алгоритм чорнокрилого шуліки (BKA) та алгоритм штучної імунної системи (EIAIS), до задач календарного планування ІТ-проєктів. Результати проведеного аналізу наукових публікацій підтверджують, що використання гібридних метаевристик дозволяє ефективно мінімізувати тривалість проєктів та витрати, адаптуючись до динамічних умов розробки. Подальші перспективи дослідження передбачають проведення експериментів із зазначеними та іншими алгоритмічними рішеннями на базі визнаних спеціалізованих бібліотек тестових задач (бенчмарків), таких як PSPLIB, MSLIB та SSLIB, а також розробку нових адаптивних методів колективного інтелекту розв'язання задач календарного планування з обмеженими ресурсами.

**Ключові слова**: задачі оптимізації, методи колективного інтелекту, проблема календарного планування проєктів з обмеженими ресурсами, управління ІТ-проєктами.

# METHODS OF COLLECTIVE INTELLIGENCE AS AN EFFECTIVE TOOL FOR SOLVING SCHEDULING PROBLEMS WITH LIMITED RESOURCES IN IT PROJECTS

**Fedorenko V., Tryus Yu.**
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** Managing modern IT projects requires solving complex optimisation problems, as limited resources, varying developer skills and alternative work modes significantly complicate scheduling. This paper investigates the Resource-Constrained Programme Scheduling (RCPSP) problem and its variants. Due to the NP-complexity of these mathematical models, classical exact methods for solving them are ineffective on a practical scale. The main focus of the research is the application of collective (swarm) intelligence and evolutionary modelling methods, such as the quantum particle swarm optimisation (HQPSO), combinatorial algorithms (CABFIA), the improved gazelle algorithm (GOAIP), the hybrid ant colony optimisation (HACO), the two-phase genetic algorithm (2PGA), the hybrid learning algorithm (HGA), as well as the latest approaches: the black-winged kite algorithm (BKA) and the artificial immune system algorithm (EIAIS), to IT project scheduling tasks. The results of the analysis of scientific publications confirm that the use of hybrid meta-heuristics allows for the effective minimisation of project duration and costs by adapting to dynamic development conditions. Future research prospects include conducting experiments with these and other algorithmic solutions based on recognised specialised libraries of test problems (benchmarks), such as PSPLIB, MSLIB and SSLIB, as well as the development of new adaptive collective intelligence methods for solving resource-constrained scheduling problems.

**Keywords:** optimisation problems, collective intelligence methods, the problem of scheduling projects with limited resources, IT project management.

**Вступ.** Складність сучасного управління ІТ-проєктами полягає в необхідності постійно балансувати між жорсткими дедлайнами, обмеженими бюджетами та унікальними

компетенціями працівників IT-компаній. Традиційні підходи, такі як метод критичного шляху (CPM) або PERT, часто припускають наявність нескінченних ресурсів, що на практиці призводить до серйозних зривів строків реалізації IT-проєктів. З огляду на це, формалізація ресурсних та логічних обмежень через математичну оптимізацію стає необхідним кроком для забезпечення успішності розробки програмного забезпечення.

**Основна частина.** Класична проблема календарного планування з обмеженими ресурсами (Resource-Constrained Project Scheduling Problems – RCPSP) – це комбінаторна задача оптимізації, що належить до *NP*-складних задач, де потрібно визначити час початку кожної роботи в проєкті так, щоб загальна тривалість проєкту була мінімальною, не порушуючи при цьому технічних і ресурсних обмежень.

**Постановка класичної задачі RCPSP.** Математична формалізація RCPSP найчастіше базується на дискретному часі, де горизонт планування розбивається на атомарні часові інтервали. Використовуючи формулювання задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування на основі часових індексів, розроблене Прітскером [1] та адаптоване сучасними дослідниками, модель RCPSP визначається наступним чином.

У задачі RCPSP маємо множину робіт $J = \{1, \dots, n\}$, де кожна робота $j$ повинна виконуватися без переривання протягом $p_j$ одиниць часу. Крім того, задано множину відновлюваних ресурсів $R = \{R_1, \dots, R_k, \dots, R_m\}$, де кожен ресурс $k$ має потужність $R_k$. Кожна робота $j$ додатково має потребу в ресурсі $r_{jk}$ одиниць ресурсу $k$, що використовуються лише під час виконання роботи $j$. Природньо, припускається, що $r_{jk} \leq R_k$ для всіх робіт $j$ та ресурсів $k$.

Також задано обмеження передування $P \subseteq J \times J$, де $(i, j) \in P$ означає, що робота $i$ повинна бути завершена до початку роботи $j$.

Метою RCPSP є побудова допустимого розкладу виконання робіт, тобто визначення моментів початку $S_j$ для кожної роботи $j$ таким чином, щоб виконувалися обмеження передування, а сумарне споживання кожного ресурсу в будь-який момент часу не перевищувало доступної потужності. Ціль полягає в побудові розкладу з мінімальним часом завершення:

$$C_{max} = \max_{j \in J}(S_j + p_j),$$

який зазвичай називають makespan.

Формально задачу RCPSP можна записати так:

$$min C_{max}$$

за умов:

$$S_j + p_j \leq C_{max}, \qquad \forall j \in J,$$

$$\sum_{j \in J:\, S_j \leq t \leq S_j + p_j} r_{jk} \leq R_k, \qquad \forall t \in [0, T], k \in R,$$

$$S_i + p_i \leq S_j, \qquad \forall (i, j) \in P,$$

$$S_j \geq 0, \qquad \forall j \in J,$$

де $T$ – верхня межа тривалості виконання проєкту.

Додатково у дослідженні розглянуті розширені варіанти задачі календарного планування проєктів з обмеженими ресурсами, зокрема задача календарного планування з багатокваліфікаційними (Multi Skills) обмеженими ресурсами (MSRCPSP). Замість абстрактних "ресурсів" вводяться конкретні співробітники та "матриця навичок" (Skill Matrix), яка фіксує, які навички має кожен працівник. Також розглянута багатомодальна (Multi Mode) задача календарного планування з багатокваліфікаційними обмеженими ресурсами (MM-MSRCPSP). У даній задачі, крім багатокваліфікаційних ресурсів, додаються певні режими виконання робіт проєкту. Кожне завдання тепер містить список "режимів" (Modes). Кожен об'єкт режиму включає унікальну тривалість та відповідний їй масив споживання відновлюваних і невідновлюваних ресурсів.

Усі наведені задачі оптимізації розкладів належать до класу *NP*-складних задач. Використання відомих точних методів змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), зокрема методу гілок і меж, довело свою ефективність лише для проєктів невеликих масштабів, що охоплюють до 60 активностей, хоча кількість активностей у реальних проєктах, як правило, значно більша. Зі збільшенням кількості завдань простори рішень зростають експоненціально, що робить точні методи MILP обчислювально неспроможними та змушує дослідників шукати альтернативні підходи серед методів оптимізації, зокрема і методів колективного інтелекту, що ефективно мінімізують тривалість проєктів та витрати для даних задач.

**Методи колективного інтелекту для розв'язання RCPSP.** Для подолання обчислювальних бар'єрів сучасної комбінаторної оптимізації застосовуються метаевристики на основі колективного інтелекту. Розглянемо деякі з них.

*Гібридний квантовий алгоритм рою часток (HQPSO)* [2]. Алгоритм *HQPSO* базується на алгоритмі рою часток (*PSO*), залучаючи принципи квантової механіки для уникнення передчасної збіжності. HQPSO інтегрує оптимізаційний пошук JAYA та хаотичне відображення для найгірших 15% популяції, що значно розширює зону пошуку.

*Комбінаторний алгоритм бджолиної колонії (CABFIA)* [3]. Штучна бджолина колонія (ABC) імітує колективну поведінку бджіл під час пошуку їжі. Для посилення локального пошуку ABC об'єднали з безпохідним методом лінійного пошуку Фібоначчі (FIA), що використовує списки пріоритетів та CPLEX для швидкої генерації розкладів у прямому та зворотному напрямках.

*Покращений алгоритм оптимізації газелі (GOAIP)* [4]. Алгоритм GOA моделює стратегії виживання газелей – їхнє спокійне фуражування та різку втечу від хижаків. Алгоритм *GOAIP* адаптований для дискретних задач за допомогою тасування генів та гауссівської мутації, він добре мінімізує каскадні ефекти.

*Гібридний мурашиний алгоритм (HAntCO)* [5]. ACO імітує поведінку реальних мурах, які залишають феромонні сліди для пошуку найкоротшого шляху. HAntCO інтегрує ACO з класичними евристиками пріоритетів. У ньому також впроваджено стратегію DIFF: феромони оновлюють як найкращі, так і найгірші мурахи, якщо популяція втрачає різноманітність.

*Двофазний генетичний алгоритм (2PGA)* [6]. Генетичні алгоритми (GA) базуються на теорії еволюції, де виживають найсильніші, та механізмі генетичного наслідування. 2PGA модифікує ці принципи. Алгоритм почергово застосовує дві фази: фаза 1 примусово включає найкращі поточні рішення (інтенсифікація), а фаза 2 їх виключає з пулу батьків (диверсифікація), щоб вийти з локальних екстремумів.

*Гібридний генетичний алгоритм навчання (HGA/TLBO)* [7]. Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) моделює процес передачі знань у класі між вчителем та учнями. Алгоритм не потребує складного налаштування параметрів. Його перетворено на гібридний дискретний метод шляхом заміни фази "самонавчання" на оператор мутації (Swap).

*Алгоритм чорнокрилого шуліки (BKA)* [8]. Цей новітній алгоритм ройового інтелекту моделює мисливську та міграційну поведінку чорнокрилого димчастого шуліки. Інтегрує стратегію лідера та мутацію Коші (Cauchy mutation) для посилення глобального пошуку, гарантуючи збалансовану інтенсифікацію та швидку збіжність.

*Штучна імунна система на основі імуноглобулінів (EIAIS)* [9]. Метаевристика алгоритму натхненна біологічною імунною системою хребетних, яка розпізнає та знищує антигени. EIAIS включає унікальні процеси: соматичну рекомбінацію, гіпермутацію та перемикання ізотипів (IgG, IgA, IgE), що робить його винятково потужним для пошуку в багатовимірних просторах багатокваліфікаційних задач.

У таблиці 1 вказано, у яких роботах розглядалася та чи інша задача та якими методами їх можна розв'язати.

Таблиця 1

**Класифікація задач RCPSP**

| Назва задачі | Роботи, де розглядалася задача | Методи розв'язання |
|---|---|---|
| RCPSP | [3], [6], [7] | CABFIA, 2PGA, HGA/TLBO |
| MSRCPSP | [4], [5], [8] | GOAIP, HAntCO, BKA |
| MM-MSRCPSP | [2], [9] | HQPSO, EIAIS |

У перспективі даного дослідження планується проведення чисельних експериментів з проаналізованими алгоритмами колективного інтелекту на стандартизованих наборах даних (бібліотеках). Даний експеримент буде реалізовано на мові Python, з використанням відповідних бібліотек, зокрема: для моделювання задач RCPSP буде використана бібліотека *PyJobShop*, яка підтримує розв'язання RCPSP, MMRCPSP та дозволяє перевіряти розклади на предмет порушення обмежень; для реалізації математичних розрахунків методів колективного інтелекту будуть використані бібліотеки *NumPy* та *SciPy*, а для парсингу еталонних даних бібліотека *psplib*, що спеціально розроблена для зчитування файлів бенчмарків і підтримує безліч форматів: *psplib* та *patterson* для класичної RCPSP, також бібліотеки *rcpsp_max* і *mslib* для MSRCPSP.

**Висновки**. Задачі календарного планування IT-проєктів із численними обмеженнями на ресурси, з урахуванням кваліфікаційних навичок та багатомодальності вимагають відмови від класичного евристичного планування. Глибокий аналіз алгоритмів HQPSO, CABFIA, GOAIP, HACO, 2PGA, HGA, EIAIS та BKA доводить, що інтеграція моделей MILP із методами колективного інтелекту є ефективним інструментом для подолання *NP*-складності задач RCPSP. Вони забезпечують динамічний баланс між глобальним пошуком та локальною інтенсифікацією, гарантуючи ефективне досягнення глобальних оптимумів. Їх впровадження дозволяє генерувати гнучкі та стійкі розклади реалізації IT-проєктів, суттєво мінімізуючи витрати та прискорюючи час виходу програмного продукту на ринок (Time-to-Market) без втрати якості.

**Список використаних джерел**


1. A. Alan B. Pritsker, Lawrence J. Watters, Philip M. Wolfe. Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach. September 1969. Management Science (1969). URL: http://www.jstor.org/stable/2628369.
2. Jun Long Peng, Xiao Liu, Chao Peng, Yu Shao. Multi-skill resource-constrained multi-modal project scheduling problem based on hybrid quantum algorithm. October 2023. Scientific Reports (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-45970-y.
3. Alireza Etminaniesfahani, Hanyu Gu. An Efficient Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. 2026. SN Computer Science. Received: 2 August 2025 / Accepted: 18 February 2026. DOI: 10.1007/s42979-026-04841-7
4. Junlong Peng, Zhuo Su, Xiao Liu. Multi skill project scheduling optimization based on quality transmission and rework network reconstruction. 2025. Scientific Reports (2025) 15:13545. DOI: 10.1038/s41598-025-92342-9.
5. Paweł B. Myszkowski, Marek E. Skowroński, Łukasz P. Olech, Krzysztof Oślizło. Hybrid Ant Colony Optimization in solving Multi-Skill Resource-Constrained Project Scheduling Problem. 2015. Soft Computing, 19(12). DOI: 10.1007/s00500-014-1455-x.
6. D. Sun, S. Zhou. An Effective Two-Phase Genetic Algorithm for Solving the Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP). 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.21915.
7. Bidisha Roy, Asim Kumar Sen. An integrated hybrid metaheuristic model for the constrained scheduling problem. September 2023. IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI) (2023) 12(3):1083-1095. DOI: 10.11591/i.v12.i3.pp1083-1095.
8. Yanquan Zhang, Ruidong Chang, Hossein Omrany, Jian Zuo, Jane Burry, Ning Gu. Policy-gradient scheduling optimisation under multi-skill constraints: A comparative study on computational algorithms. November 2025. Journal of Building Design and Environment (2025) 3:202571. DOI: 10.70401/jbde.2025.0017.
9. Chunhao Li, Feng Wang, Tsuiping Chung. Multi-mode multi-skill resource-constrained project scheduling problem with differentiated professional capabilities. September 2023. Journal of Project Management (2024) 9:27-44. DOI: 10.5267/j.jpm.2023.9.002.

# ДОМІНАНТИ СПОЖИВЧОЇ ПОВЕДІНКИ НА ПЛАТФОРМАХ E-COMMERCE В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ

**Чубук Л., Харченко Т.**
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

**Анотація**. Мета дослідження полягає у виявленні домінуючих чинників, що впливають на трансформацію споживчої поведінки на маркетплейсах під час війни в Україні, з особливим фокусом на мотивацію, довіру до маркетплейсів та використання цифрових інструментів високоосвіченою молоддю. Об'єктом дослідження є споживча поведінка на платформах електронної комерції (e-commerce) в умовах воєнного стану. Предметом дослідження виступають соціально-економічні, безпекові та етичні детермінанти, що зумовлюють зміну патернів споживчого вибору, частоти здійснення онлайн-покупок та розміру середнього чека. Методи дослідження охоплюють проведення вибіркового добровільного опитування з подальшою статистичною обробкою даних, що включає групування, розрахунок середніх величин, кореляційний аналіз (Пірсона) та множинний регресійний аналіз (у пакеті Statistica 64_v. 12) із покроковим відбором змінних. Результати. Дослідження довело наявність «безпекової домінанти» як ключового стимулу купівельної активності на маркетплейсах, підтвердило схильність до високого рівня автоматизації процесів купівлі та зростання ролі соціально-етичної позиції платформ як важливого фактора лояльності для молоді.

**Ключові слова**: електронна комерція, споживча поведінка, маркетплейси, регресійний аналіз, воєнний стан.

# DOMINANTS OF CONSUMER BEHAVIOR ON E-COMMERCE PLATFORMS IN THE CONDITIONS OF WAR IN UKRAINE

**Chubuk L., Kharchenko T.**
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The aim of the study is to identify the dominant factors influencing the transformation of consumer behavior on marketplaces during the war in Ukraine, with a particular focus on motivation, trust in marketplaces and the use of digital tools by highly educated youth. The object of the study is consumer behavior on e-commerce platforms under martial law. The subject of the study is socio-economic, security and ethical determinants that cause changes in consumer choice patterns, the frequency of online purchases and the size of the average check. The research methods include conducting a random voluntary survey with subsequent statistical data processing, including grouping, calculation of averages, correlation analysis (Pearson) and multiple regression analysis (in the Statistica 64_v. 12 package) with stepwise selection of variables. Results. The study proved the presence of a "security dominant" as a key driver of purchasing activity on marketplaces, confirmed the tendency towards a high level of automation of purchasing processes and the growing role of the socio-ethical position of platforms as an important loyalty factor for young people.

**Keywords:** e-commerce, consumer behavior, marketplaces, regression analysis, martial law.

**Вступ**. Однією з визначальних ознак сучасної поведінки споживача є формування нової моделі споживання. Споживчий вибір різних вікових груп споживачів традиційно відрізняється у різних аспектах, особливо в онлайн форматі, а високі темпи розвитку е-комерції прискорюють диджитальну трансформацію у поведінці категорії молодих споживачів. Ця трансформація пов'язана не лише із викликами сталого розвитку, але й з раціоналізацією купівель, відходом від тиску «вартості» чи «авторитетності» брендів, інституційними проявами національного забарвлення купівельного вибору, ширшим використанням віртуальних асистентів та інших інструментів ШІ. Кількісна оцінка патернів вибору українських споживачів дозволить обґрунтувати механізми переходу до моделі сталого розвитку цифрової торгівлі.

**Мета дослідження**. Дослідження спрямоване на виявлення домінуючих чинників, що впливають на споживчу поведінку на маркетплейсах під час війни в Україні, в контексті мотивації до купівель онлайн на торговельних майданчиках, формування довіри до онлайн платформ, використання цифрових інструментів та ін. Фокус уваги при пошуку проявів трансформації споживчої поведінки та домінуючих чинниках, які справляють на неї вплив,

зосереджено на найбільш цифровізованій частині населення – молоді з високим рівнем освіти, досвідом роботи з інструментами AI та відсутністю бар'єрів доступу до платформ e-commerce.

**Постановка проблеми**. Існуючі періодичні репрезентативні опитування як джерело інформації про споживчі настрої та моделі споживчої поведінки на маркетплейсах створюють суттєве підгрунття для розуміння загальних тенденцій змін споживчих настороїв українців під час війни [1; 2; 3]. Проте такі дослідження наразі не дають подібно до західних [4; 5] поглибленого уявлення про актуальні зміни споживчої поведінки з позицій причинно-наслідкових зв'язків, зокрема, не зосереджуються на вивченні впливу цифровізації та AI на поведінку споживачів, моделюванні залежностей споживчого попиту від соціо-економічних факторів та схильності до онлайн купівель залежно від соціального чи цифрового портрету споживача та ін.

**Результати дослідження**. Результати дослідження базуються на вибірковому добровільному опитуванні респондентів (що відображає їх суб'єктивне відчуття ступеня залученості до придбань через онлайн платформи, формування у них довіри до маркетплейсів) з подальшою статистичною обробкою результатів. Крім узагальнення даних через групування і розрахунок середніх, було також здійснено кореляційно-регресійний аналіз з метою виявлення найсуттєвіших факторів впливу на споживчі рішення про купівлю, які б могли пояснити зміну моделей поведінки споживачів та роль у цих процесах таких різнопланових драйверів, як воєнні ризики чи поширеність інструментів штучного інтелекту в e-commerce. Період проведення опитування – лютий 2026 року. Цільовою аудиторією були здобувачі освіти усіх рівнів – студенти бакалаврату, магістратури та аспіранти університету (анкети поширювались у КНУТШ), тобто молодь з високим рівнем освіти віком від 18 до 35 років з можливостями доступу до онлайн опитування (що було зумовлено методами поширення та збору даних). У межах дослідження опитувані (відповіді надійшли від 235 респондентів) були розділені за соціальними та диджитальними характеристиками споживачів на умовні групи за віком, статтю, статусом зайнятості, поточним місцем перебування, середовищами та цифровими сервісами, які застосовуються для здійснення покупок на маркетплейсах тощо.

Гіпотези дослідження були спрямовані на виявлення основних факторів і прагматично-раціональних та емоційно-етичних аспектів трансформації споживчої поведінки на платформах e-commerce у колі молодих споживачів в умовах воєнних дій в країні. Зокрема, робилося припущення про існування певного «цифрового розриву» за віковими характеристиками споживачів і більш високого рівня адаптованості студентської молоді до нових функцій маркетплейсів порівняно із старшими віковими групами, більш раціональної поведінки та відмови від офлайн купівлі окремих товарів, використання диджиталізації та електронної комерції безпосередньо як інструментів економії. Тенденції споживацьких настроїв українців в умовах війни є предметом репрезентативних періодичних опитувань консалтингових та аналітично-дослідницьких компаній, що дають уявлення про середній рівень залученості різних вікових груп до купівель через e-commerce платформ та рівень диджиталізованості покупців.

Для виявлення детермінант трансформації споживчої поведінки на українському ринку маркетплейсів в умовах воєнного стану при аналізі результатів вибіркового опитування було застосовано метод множинної регресії з покроковим відбором змінних (Forward Stepwise), реалізований у середовищі Statistica 64_v. 12. У ході дослідження було побудовано дві моделі: першу для аналізу частоти здійснення онлайн-покупок, другу – для аналізу зміни середнього чека під впливом факторів споживчої поведінки.

На попередньому етапі було сформовано вхідні дані моделі шляхом прекодування порядкових, бінарних та дихотомічних змінних відповідей респондентів. Серед незалежних чинників моделей було обрано соціальні і цифрові характеристики споживачів, пов'язані із статтю, віком, освітнім рівнем, комфорт автоматизації користування маркетплейсом (Gender_Female Age_Group, Education_Level, Automation_Preference), фактори що репрезентують довіру до платформи e-commerce та (Trust_1 – 8), фактори причин онлайн-

купівель (Reason_1 – 6), вподобані споживачами маркетплейси (Market_1 – 23) та статус зайнятості (Job_1 – 4).

На першому етапі аналізу було побудовано матрицю парних кореляцій Пірсона для всіх досліджуваних параметрів. Аналіз матриці дозволив виявити стійкі статистично значущі зв'язки ($p < 0,05$) між показниками довіри до платформи та частотою здійснення покупок. Відсутність надмірно високих коефіцієнтів кореляції ($r > 0,7$) між незалежними змінними свідчить про відсутність явища мультиколінеарності, що підтверджує коректність подальшого застосування методу множинної регресії.

Кореляційний аналіз виявив окремі специфічні зв'язки між факторами, які дають уявлення про цифрові характеристики молодих споживачів та їх лояльність до певних маркетплейсів. Так, виявлено зв'язок між ціннісною орієнтацією на досвід інших споживачів (відгуки та можливість порівняння товарів) та вибором глобальних маркетплейсів, зокрема AliExpress ($r = 0,134$; $p < 0,05$). Це свідчить про те, що для певної групи споживачів інструментарій платформи (система рейтингів та фото-відгуків) є критично важливим компенсаторним механізмом, який мінімізує ризики при транскордонних покупках. Кореляційний аналіз виявив також дихотомію споживчих мотивацій залежно від спеціалізації платформи. Для лідерів універсального сегменту характерна домінанта прагматичних чинників, зокрема для Rozetka – економії часу ($r = 0,157$; $p < 0,05$), а для Prom – зручності логістики ($r = 0,165$; $p < 0,05$). Натомість для нішевого лідера сегменту б'юті-товарів Makeup виявлено статистично значущу кореляцію із соціо-етичними характеристиками платформи, такими як соціальна позиція платформи, допомога збройним силам ($r = 0,146$; $p < 0,05$), волонтерство ($r = 0,146$; $p < 0,05$), етична позиція брендів ($r = 0,146$; $p < 0,05$), бажання підтримати українського виробника ($r = 0,173$; $p < 0,05$). Це дозволяє стверджувати, що в умовах війни споживання набуває ознак етичного забарвлення, коли відповідна соціо-етична позиція самого маркетплейсу стає критичним фактором лояльності для сегментів споживачів з високим емоційним залученням.

На другому етапі здійснено моделювання частоти здійснення онлайн-покупок та зміни середнього чека під впливом факторів споживчої поведінки.

1. Моделювання частоти онлайн-покупок (поведінковий аспект залученості до купівлі через платформи e-commers). Перша регресійна модель, де залежною змінною виступила частота покупок (Freq_Shopping_Change), продемонструвала високу статистичну значущість ($p < 0,009$). Після оптимізації переліку факторів (відсіювання незначущих змінних Trust, Reason та Job), було встановлено, що частота покупок детермінується сукупним впливом двох ключових предикторів (табл. 1), а саме: фактором безпеки (Reason_6, beta = 0,145, p = 0,025) – відсутність необхідності перебування у місцях масового скупчення людей при купівлі та фактором преференції аквтоматизації (Automation_Preference, beta = 0,140, p = 0,029) – рівень автоматизації сервісу, якому віддає перевагу користувач.

Незважаючи на відносно низький коефіцієнт детермінації ($R^2$=0,0398), що може бути пояснений через складність вимірювання залежностей поведінкових моделей у кризові періоди, значущість моделі підтверджує стійкий зв'язок між безпековими перевагами, схильністю до автоматизації сервісів купівлі та цифровізацією споживання.

Таблиця 1

**Підсумкова таблиця регресії (частота покупок)**

| N=235 | Regression Summary for Dependent Variable: Freq_Shopping_Change (Regression_Frequency_Results_encoded_data_fixed) R= 0,19949130 $R^2$= 0,03979678 Adjusted $R^2$ = 0,03151917 F(2,232)=4,8078 p<0,00900 Std.Error of estimate: 0,89212 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | b* | Std.Err. of b* | b | Std.Err. of b | t(232) | p-value |
| Intercept | | | 3,302980 | 0,260178 | 12,69505 | 0,000000 |
| Reason_6 | 0,144814 | 0,064350 | 0,335807 | 0,149220 | 2,25041 | 0,025360 |
| Automation_ Preference | 0,140531 | 0,064350 | 0,207769 | 0,095139 | 2,18384 | 0,029976 |

Аналіз адекватності моделі. Перевірка моделі за допомогою графіка нормального розподілу залишків (Normal probability plot of residuals) підтвердила її адекватність: спостереження концентруються вздовж теоретичної прямої. Розрахований критерій Дарбіна-Уотсона склав d = 1,8737, що знаходиться в межах оптимальних значень (близько 2,0) і свідчить про відсутність автокореляції залишків. Це підтверджує високу якість отриманої статистичної моделі.

2. Моделювання залежності зміни розміру середнього чека від факторів (фінансовий аспект змін споживчої поведінки). Друга спроба моделювання, де залежною змінною виступила зміна середнього чека (Avg_Check_Change), показала відсутність загальної статистичної значущості за показником p-value (p=0,079). Навіть після оптимізації моделі та залишення найбільш впливових чинників – статусу підприємця (Job_1, β=0,119) та фактора безпеки (Reason_6, β=0,087) – модель залишилася на рівні статистичної тенденції, не подолавши критичний поріг p-value p<0,05.

**Висновки**. Таким чином, регресійний аналіз дозволив виявити феномен «безпекової домінанти» у споживчій поведінці (безпека є ключовим стимулом активності на маркетплейсах), а також схильність молодих споживачів до високого рівня автоматизації процесів купівлі. Водночас виявлено «руйнування» традиційних моделей фінансової поведінки, коли середній чек перестає бути прогнозованою величиною. Винятком є група осіб, зайнятих підприємницькою діяльністю, які демонструють найбільш виражену тенденцію до зростання витрат, що пояснюється їхньою вищою адаптивністю та використанням цифрових платформ для операційної діяльності.

## Список використаних джерел


1. Delloite. (2023, 30 березня). Споживацькі настрої українців після повномасштабного вторгнення. URL: https://www.deloitte.com/content/dam/assets-zone2/ua/uk/docs/about/2024/Deloitte-Survey-2022-Consumer-sentiment-during-the-war.pdf
2. Delloite. (2024, 13 березня). Споживацькі настрої українців у другий рік повномасштабного вторгнення. URL: https://www.deloitte.com/ua/uk/about/press-room/consumer-behavior-2024.html
3. Delloite. (2025, 18 березня). Споживацькі настрої українців у 2025 році. URL: https://www.deloitte.com/content/dam/assets-zone2/ua/uk/docs/industries/consumer/2025/consumer-behavior-research-ukraine-2025-ua.pdf
4. Zhenxin Liu. (2024). Transformations in Consumer Buying Behavior: Investigating How Online Shopping Platforms. Proceedings of ICEMGD 2024 Workshop: Innovative Strategies in Microeconomic Business Management. DOI: 10.54254/2754-1169/109/2024BJ0135
5. Zhigang Wang. (2025). The influence of AI on consumer behavior: Shaping choices and preferences in the digital marketplace. Systems and Soft Computing, Volume 7, December 2025ю DOI: https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200397200397

# DEEP LEARNING-BASED RECONSTRUCTION OF STIFFNESS MAPS FROM RAY DEVIATIONS IN SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY

**Barannik E.A., Hrytsenko M.O.**
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This work presents a proof-of-concept study of a learnable inverse problem in shear wave elastography based on a geometric representation of wave propagation. Instead of using local shear-wave speed estimates, the input data are represented by transverse deviations of ray trajectories in a two-dimensional heterogeneous medium. A supervised numerical dataset with known stiffness perturbation maps was generated using smooth Gaussian inclusions over a constant background. Two neural network models, a fully connected MLP and a convolutional RayCNN, were trained to reconstruct stiffness perturbation maps from ray-deviation patterns. The results show that the proposed representation is sufficiently informative for stiffness reconstruction, while the convolutional architecture substantially outperforms the MLP by exploiting the spatial ordering of neighboring ray deviations. The study demonstrates the feasibility of ray-geometry-based reconstruction and motivates further development toward more realistic numerical and experimental SWE scenarios.

**Keywords**: shear wave elastography; inverse problem; ray trajectories; stiffness reconstruction; deep learning; convolutional neural network; heterogeneous media

**Introduction**. Shear wave elastography (SWE) is one of the key ultrasound-based methods for the quantitative assessment of the mechanical properties of soft tissues [1]. In complex heterogeneous media, the assumption of locally homogeneous shear-wave propagation becomes limiting. An alternative is a geometric description of wave propagation, in which the inverse problem is formulated in terms of deviations of ray trajectories. Modern SWE methods make the estimation of the local propagation direction feasible: the local phase-gradient method recovers wave-vector components in ultrafast plane-wave imaging [2]; two-dimensional schemes for shear-wave speed estimation provide direct access to the local propagation direction [3]; and real-time tracking of curved wavefronts, local phase-velocity imaging, and 3D ultrafast acquisitions establish an experimental basis for reconstructing ray geometry. In parallel, deep learning has become a fundamental tool for medical image analysis and, in the context of ultrasound elastography, for the direct reconstruction of stiffness maps [4]: DSWE-Net reconstructs Young's modulus maps from tissue velocity fields after an ARF push, whereas physics-informed approaches such as SWENet and SELFNet incorporate physical equations directly into the training process.

**The purpose of this work** is to verify whether the proposed geometric representation in the form of ray deviations is sufficiently informative for a learnable inverse problem in a controlled numerical environment; thus, the study has a proof-of-concept character.

**Formulation of the problem**. The task is to find a mapping from a set of ray deviations, $\Delta x_i(y_j)$ in a two-dimensional heterogeneous medium to a two-dimensional amplitude map of the spatial distribution of stiffness perturbation. This mapping is implemented by a neural network without an explicit analytical inversion model embedded either in the architecture or in the loss function.

**Solving the problem**. The direct problem of shear-wave propagation in a heterogeneous medium was solved using the method of characteristics [5] for the eikonal equation. In a two-dimensional domain $[0,6]^2$in arbitrary spatial units, trajectory integration was performed with a fixed step $d = 0.05$. From the lower boundary of the domain, $Q = 50$ rays were launched with uniformly distributed initial coordinates $x_0$. The rays propagated in the direction of increasing $y$ until they reached the upper boundary or left the computational domain. Since ray trajectories carry local information about heterogeneities — in regions of increased stiffness, neighboring rays bend coherently, forming a characteristic geometric signature — transverse ray deviations from straight-line trajectories were selected as the input features of the neural network. For each ray $i$, at

fixed levels $y_j$ with a total number of $N_y$, the values $\Delta x_i(y_j) = x_i(y_j) - x_{0,i}$ were computed. The set of values forms a feature vector of dimension $Q \times N_y = 3000$ , which preserves both the amplitude and the relative ordering of distortions of neighboring rays.

To construct a supervised dataset with a known ground truth, the target stiffness field was represented as a superposition of local smooth perturbations over a constant background $\mu_0$.

$$\mu(x,y) = \mu_0 \left(1 + \sum_k A_k \cdot exp\left(-\frac{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)\right), \quad (1)$$

where the summation is performed over $k \in \{1,2,3\}$. Gaussian components with random amplitudes $A_k \in [0,0.95]$, radii $\sigma_k$ and centers $(x_k, y_k)$, predominantly concentrated within the subdomain $[2,4]^2$. This choice was made to ensure the physical informativeness of the inverse problem, since rays launched from the lower boundary $y = 0$ have inherently limited sensitivity to heterogeneities located in the immediate vicinity of the lateral boundaries. The target quantity for the neural network is the discretized perturbation map

$$p(x,y) = \frac{\mu(x,y)}{\mu_0} - 1. \quad (2)$$

On a $45 \times 45$ grid, i.e., a vector of length $2025$. An example of the investigated distributions and ray trajectories is shown in Fig. 1.

The complete dataset of 5000 fields was divided into training and test subsets containing 4500 and 500 samples, respectively. The input features were standardized component-wise, while the target field was normalized using a single pair of parameters, mean and standard deviation, estimated from the training set.

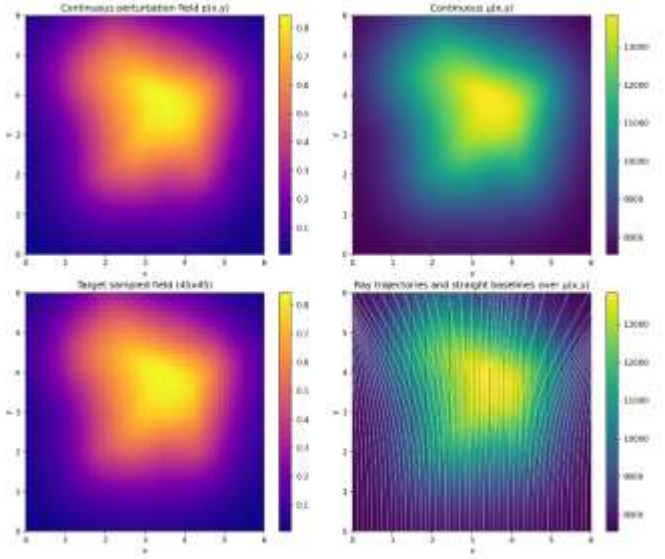


Fig. 1. Random field $\mu(x,y)$, the corresponding perturbation field $p(x,y)$ , the sampled field and the corresponding ray trajectories

To solve the inverse problem, two neural network architectures were implemented and compared: a fully connected multilayer perceptron and a convolutional RayCNN model. In RayCNN, the input ray-deviation vector was interpreted as a single-channel $50 \times 60$ image and processed using an encoder–bridge–decoder structure. The encoder extracted spatial features from the ray-deviation map, the fully connected bridge provided global information mixing, and the decoder reconstructed the output perturbation map on a $45 \times 45$ grid. Both models were trained using the MSE loss function, the Adam optimizer with a learning rate of $5 \cdot 10^{-4}$, weight decay of $10^{-4}$, and early stopping based on the validation error.

Both models were trained on the same dataset and evaluated on a common independent test set of 500 examples. The resulting metrics are presented in Table 1. As integral reconstruction characteristics, we considered the global MAE and RMSE computed over all pixels of all test maps, as well as the relative RMSE normalized by the individual RMS amplitude of each sample, which provides a scale-robust measure of reconstruction accuracy across samples.

Table 1

**Model comparison metrics**

| Metric | MLP | CNN | Improvement |
|---|---|---|---|
| Global MAE | 0.0411 | 0.0234 | −43% |
| Global RMSE | 0.0621 | 0.0393 | −37% |
| Relative RMSE, mean | 24.80% | 14.18% | −10.6 p.p. |
| Relative RMSE, median | 22.71% | 12.81% | −9.9 p.p. |

Examples of the reconstruction of random distributions using the CNN model are shown in Fig. 2.

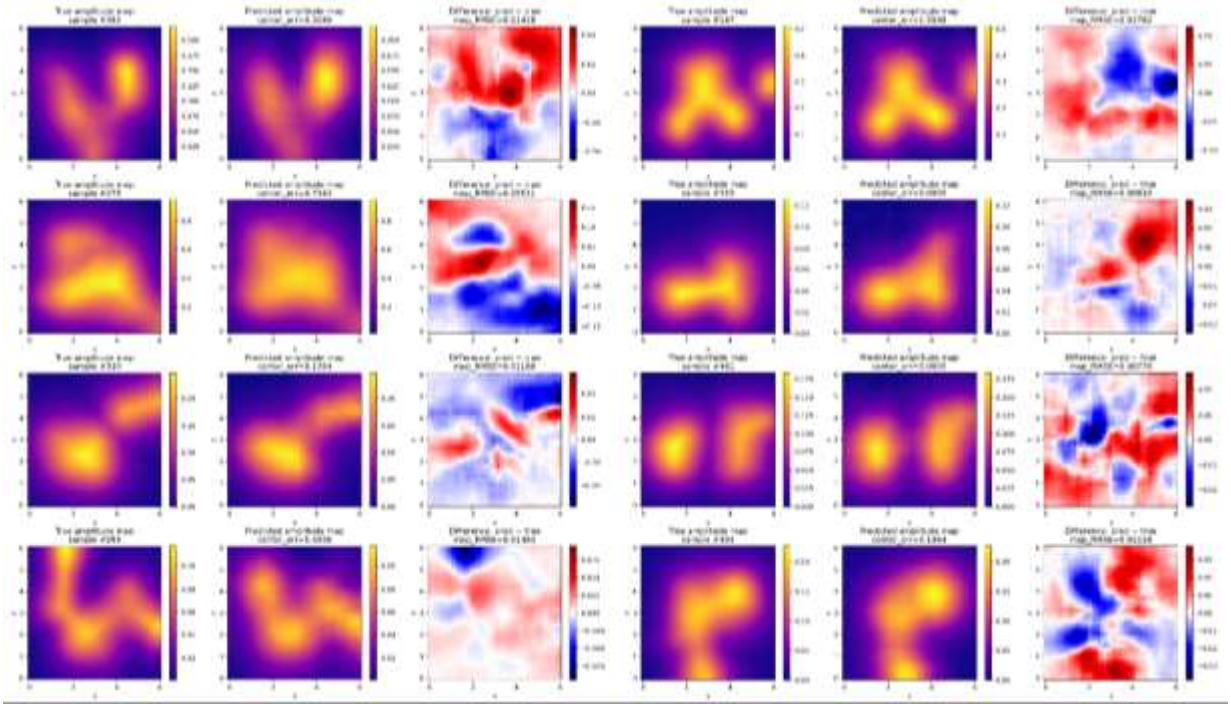


Fig. 2. Examples of stiffness CNN reconstruction and RMSE error maps

**Conclusion**. The performed study leads to two main conclusions. The first one is general: the inverse problem of reconstructing a two-dimensional stiffness map from geometric ray deviations is, in principle, solvable using supervised machine learning methods without incorporating physical equations either into the loss function or into the model architecture. This is supported by the fact that even a simple fully connected MLP achieves a median relative error of approximately 22%, substantially outperforming trivial baseline estimates and indicating that the proposed input-feature representation is sufficiently informative.

The second conclusion is more specific but conceptually important: the convolutional RayCNN architecture substantially outperforms the MLP while using a significantly smaller number of parameters. This indicates that useful information is contained not only in the set of individual deviations of each ray, but also in their local ordering. Near a heterogeneity, neighboring rays bend coherently, and their collective spatial structure carries an additional signal that convolutional filters can extract efficiently. A fully connected network has to learn this spatial dependence from the data from scratch, whereas the CNN benefits from it as an intrinsic architectural inductive bias, which proves quantitatively decisive for reconstruction quality. The obtained results open a path toward further model refinement, dataset expansion, and transition to more physically realistic numerical and experimental scenarios of SWE imaging.

## References


1. M. S. Taljanovic, L. H. Gimber, G. W. Becker, M. M. Latt, A. S. Klauser, D. M. Melville, L. Gao, J. P. Witte, "Shear-Wave Elastography: Basic Physics and Musculoskeletal Applications," *RadioGraphics*, vol. 37, no. 3, pp. 855–870, 2017.
2. E. González-Mateo, F. Camarena, N. Jiménez, "Real-time ultrasound shear wave elastography using a local phase gradient," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 260, 108529, 2025.
3. J. F. Greenleaf et al., "Shear wave group velocity estimation using spatiotemporal peaks and amplitude thresholding," U.S. Patent 11,224,409 B2, 2022.
4. H. Li, M. Bhatt, Z. Qu, S. Zhang, M. C. Hartel, A. Khademhosseini, G. Cloutier, "Deep learning in ultrasound elastography imaging: A review," *Medical Physics*, vol. 49, no. 9, pp. 5991–6018, 2022.
5. Cerveny V, Seismic Ray Theory, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.

# DYNAMIC LOAD BALANCING OF IMPLEMENTERS IN A COLLABORATIVE PROJECT MANAGEMENT SYSTEM

**Ivaskiv R., Neroda T.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract**. The problem of dynamic workload management for implementers in collaborative academic project support systems is considered. As an extension of the formal media platform model, an implementer profile is proposed comprising a unique identifier, competency level assessments, project participation history, and an accumulated contribution rating. Based on the profile, a three-component *Match* scoring function is defined: the breadth of competency coverage for stage requirements (*CompetencyScore*); the contextuality coefficient *Continuity*, which prioritises implementers with prior experience in the project or on adjacent stages; and the integral availability factor *Avail*, reflecting the implementer's current workload across concurrent projects and the overlap of working hours with the team accounting for time zone differences. A mechanism for dynamic recalculation of stage weights $W_i$ based on deviation of actual progress from the planned value is substantiated, with normalisation of active parallel stage weights and critical path prioritisation. A two-level balancing strategy is defined: *Level 1* activates upon any $W_i$ deviation between parallel stages and performs internal implementer redistribution; *Level 2* triggers Match-scoring across all authorised system users only when the critical threshold $W_{threshold}$ is exceeded. Four team risk event classes are classified: bus factor, early project departure, vacation, and contract expiry. An integrated project risk index for the management dashboard is proposed. The model is intended for implementation as a standalone web-based platform; its formal architecture is system-agnostic and compatible with integration into existing project management tools via standard APIs. The approach directly extends the authors' prior media platform and aims to improve the resilience of collaborative projects to unpredictable team composition changes.

**Keywords**: load balancing; project management; implementer competencies; dynamic task routing; academic media platform; risk factors.

**Introduction**. In contemporary academic environments, collaborative scientific and educational projects are increasingly carried out within geographically distributed teams, where participants are situationally engaged across multiple projects simultaneously. The growing complexity of such project activity demands specialised tools not only for resource planning and progress control, but also for automated response to dynamic changes in team composition. Time zone differences in distributed teams significantly narrow the windows of effective interaction, while a non-fixed participant pool renders deterministic planning methods inapplicable.

A review of current research reveals substantial progress in related fields, yet none of the examined approaches addresses the problem in its entirety. A research group [2] systematises the functionality of modern project management information systems, demonstrating broad resource planning capabilities, but notes the absence of automated response mechanisms for unpredictable changes in non-fixed academic team composition. Another group of researchers [3] proposes an effective competency-based approach to multi-objective implementer assignment, though it targets stable corporate environments and does not accommodate dynamic redistribution. The authors of [4] investigate the bus factor concept and document the risks of unique competency concentration, but limit their analysis to descriptive findings without formalised response mechanisms. A research team [5] examines collaborative dynamics in open-source projects and highlights the role of the project manager, yet offers no prescriptive algorithms for workload redistribution. The works [6, 7] formalise the team formation problem under competency-based criteria and conditions of uncertainty, but focus exclusively on static team assembly at the outset, without mechanisms for redistributing implementers during execution. Researchers in [8] empirically study success factors of distributed agile teams, identifying the critical role of temporal overlap, while studies [9, 10] develop approaches to multi-project scheduling under uncertainty — yet neither direction is adapted to an academic environment with a non-fixed participant pool. In [1], the authors proposed a collaborative project support media platform with the formal stage model $E_i = \{S_j, \{\{K_1, T_1\}, \dots\}, R\{R_b, R_d\}, W_i\}$, establishing a foundation for structured scientific project management. However, the question of dynamic response to team composition changes and load balancing across parallel stages was left unaddressed in that model. Thus, the development of formalised dynamic load balancing mechanisms for implementers is a relevant problem that directly

extends the authors' prior work.

**The purpose of the work** is to develop a model of dynamic load balancing for project implementers, accounting for their competencies, availability, and risk factors within a collaborative scientific project management system.

**Formulation of the problem**. Consider a project $P = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ comprising a set of parallel and sequential stages. Each implementer $S_j$ is characterised by a profile $U_s = \{Id, \{K_1, K_2, \dots\}, History, Rating\}$, where *Id* is the unique system identifier, *History* is the record of participation in prior projects, and *Rating* is an accumulated contribution score. Each active stage $E_i$ is associated with a set of competency requirements $K_i$ and a current weight $W_i$ reflecting the stage's relative significance. The task is to construct an assignment function $E_i \to S_i$ that ensures continuous project execution under conditions of implementer refusal, reduced availability, stalling (freezing) of an individual stage, or occurrence of risk events — by maximizing $Match(S_j, E_i)$ while maintaining normalisation of the weights of active parallel stages.

**Solving the problem**. The actual availability of the implementer $S_j$ is formalised as an integral factor $Avail(S_j) = f(ProjectLoad(S_j), TimeOverlap(S_j, Team))$, where $ProjectLoad(S_j) \in [0.0, 1.0]$ reflects the current workload across concurrent projects (1.0 = fully occupied), and $TimeOverlap(S_j, Team) \in [0.0, 1.0]$ represents the overlap of working hours with the team accounting for time zone differences. Both components together yield a single measure of an implementer's fitness for engagement at a given moment.

Building on the availability factor, the candidate scoring function for the stage $E_i$ is defined as: $Match(S_j, E_i) = CompetencyScore(S_j, E_i) \cdot Continuity(S_j, P) \cdot Avail(S_j)$. The component $CompetencyScore(S_j, E_i) \in [0.0, 1.0]$ evaluates the breadth of coverage of requirements $K_i$ by the implementer's competencies: an implementer whose skills cover a greater share of the requirements receives a higher score — the system supports partial matching and ranks candidates rather than discarding them upon incomplete overlap. The coefficient $Continuity(S_j, P) \in [1.0, 2.0]$ captures contextual experience: if $S_j$ has previously executed tasks in project *P* or on adjacent stages, $Continuity > 1.0$, reducing onboarding time and lowering the risk of errors; for new participants, $Continuity = 1.0$ acts as a neutral multiplier. When *TimeOverlap* is low but *ProjectLoad* is small, the task is assigned with a time shift aligned to the implementer's available slot.

Stage weights $W_i$ are recalculated dynamically throughout project execution: when actual progress $\delta_i$ falls behind the planned $\delta_{i\_plan}$, the value $W_i(E_i)$ increases; when ahead, it decreases. Normalisation maintains the constant sum of weights across active parallel stages, while critical path analysis ensures priority elevation $W_i$ for stages that block the completion of subsequent ones, regardless of their local progress.

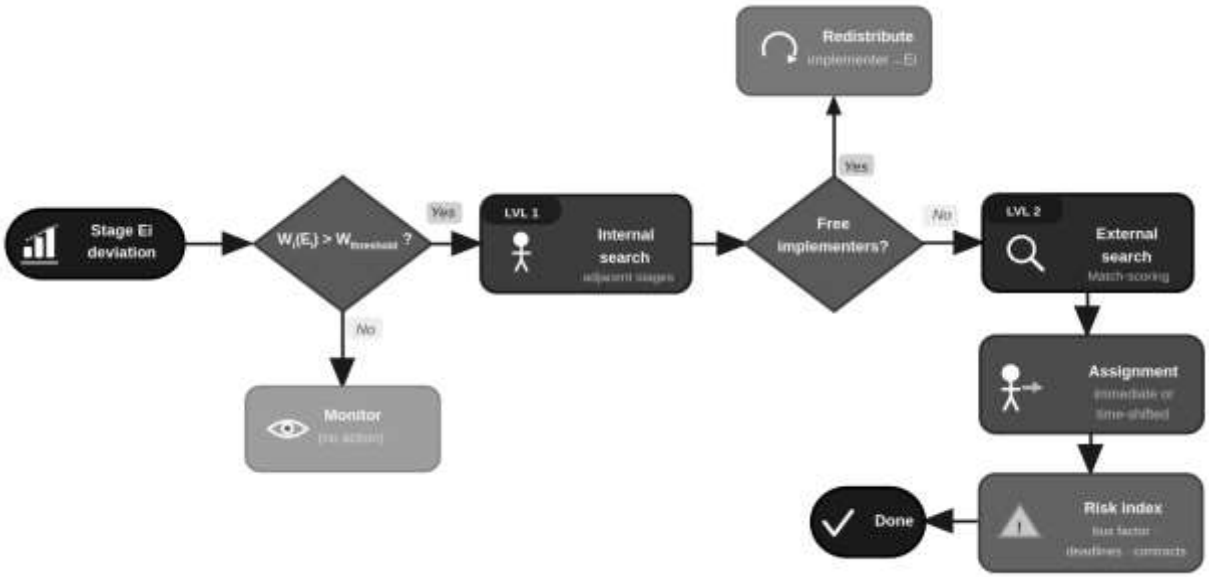



Fig. 1. Two-level load balancing strategy for collaborative project implementers

To respond to $W_i$ deviations, a two-level balancing strategy is implemented, as shown in Fig. 1. *Level 1* activates when $W_i(E_i)$ exceeds the critical threshold $W_{threshold}$: the system identifies implementers with similar competencies on lower-priority stages and initiates internal redistribution in favour of the critical stage. If the internal reserve is exhausted, *Level 2* activates: Match-scoring is extended to all authorised system users, avoiding unnecessary invitations in non-critical situations.

For preventive management of team stability, four classes of risk events are identified: concentration of unique competencies in a single implementer (bus factor), sudden loss of an implementer before stage completion, planned temporary unavailability (vacation), and predictable loss with a known date (contract expiry).

Based on these factors, an integrated project risk index is computed and displayed on the system dashboard alongside the existing project map and stage map components.

**Conclusion**. The proposed approach extends the formal media platform model [1] with dynamic load balancing mechanisms. The introduction of an implementer profile with rating, the three-component *Match* function with the *Continuity* coefficient, the two-component availability factor *Avail*, and the two-level search strategy ensures continuity of collaborative projects under unpredictable team composition changes. The classification of four risk event classes and the integrated risk index form the foundation for further development of predictive mechanisms for team stability management. A promising direction is the formalisation of the competency degradation model — a mechanism for reducing the effective level $K_n$ of an implementer depending on the recency of skill use, derivable from the History component of the implementer profile via timestamps of prior project participation, enabling a time-decay function over $K_n$ as a function of the interval $\Delta t$ since last application, — and its integration into the *CompetencyScore* function, alongside the determination of optimal threshold values for $W_{threshold}$.

## References


1. Ivaskiv R., Neroda T. Designing the Integrated Multi-User Media Platform for Educational and Scientific Research Support. Proceedings of IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2019. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2019.8929880.
2. Rebuglio M. et al. Project Management Information Systems: a Systematic Review. Procedia Computer Science. 2025. Vol. 256. P. 1739–1747. DOI: 10.1016/j.procs.2025.02.313.
3. Wang X., Ferreira F.A.F., Yan P. A multi-objective competency-based decision support system for the assignment of internal auditors to multiple projects. Annals of Operations Research. 2024. Vol. 338. P. 303–334. DOI: 10.1007/s10479-024-05855-3.
4. Jabrayilzade E., Tekinerdogan B. Bus Factor in Practice. Proceedings of 44th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE SEIP). ACM. 2022. DOI: 10.1145/3510457.3513082.
5. Pal S., Nair A., Zuo Z. Collaborative dynamics in open source software development: Unveiling the influence of team interaction and the role of project manager. Journal of Operations Management. 2024. Vol. 70, No. 7. P. 1076–1099. DOI: 10.1002/joom.1324.
6. Kononenko I., Kononenko O., Babayev I., Abdullayev R. Formalising the Formation of Project Teams Considering Alternative Competence Assessments Under Uncertainty. Radioelectronic and Computer Systems. 2025. No. 2(114). P. 253–263. DOI: 10.32620/reks.2025.2.16.
7. Hamidi Rad R., Fani H., Bagheri E., Kargar M., Srivastava D., Szlichta J. A Variational Neural Architecture for Skill-based Team Formation. ACM Transactions on Information Systems. 2023. Vol. 42, No. 1. DOI: 10.1145/3589762.
8. Adzgauskaite M., Tam C., Martins R. What helps Agile remote teams to be successful in developing software? Empirical evidence. Information and Software Technology. 2024. Vol. 177. Art. 107593. DOI: 10.1016/j.infsof.2024.107593.
9. Aghileh M., Tereso A., Alvelos F., Lopes M.O.M. Multi-project scheduling under uncertainty and resource flexibility: a systematic literature review. Production & Manufacturing Research. 2024. Vol. 12. DOI: 10.1080/21693277.2024.2319574.
10. Satic U., Jacko P., Kirkbride C. A simulation-based approximate dynamic programming approach to dynamic and stochastic resource-constrained multi-project scheduling problem. European Journal of Operational Research. 2024. Vol. 315, No. 2. P. 454–469. DOI: 10.1016/j.ejor.2023.10.046.

# AI TOOLS FOR PHD RESEARCHERS

**Kozolup Ye.[1], Strutynska O.[1,2]**
[1]Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine
[2]Université Côte d'Azur, Nice, France

**Abstract**. The research is devoted to integrating artificial intelligence (AI) tools into the postgraduate research process and to assessing Ukrainian PhD students' readiness for these changes. The rapid development of generative AI technologies after 2022 has created new challenges for young scientists, including the question of whether it is advisable for researchers to use AI for collaboration and co-creation.

The results of this research are based on an online survey of Ukrainian PhD students. The results showed that most respondents consider themselves aware of the potential of using AI tools in research. Despite the general interest and active use, respondents' views differ regarding the future transformation of research forms under the influence of AI. The survey also revealed a need for additional training and coaching on the effective use of AI tools.

**Keywords:** artificial intelligence, PhD research, generative AI, scientific research, human-AI co-creation.

**Introduction.** The process of conducting scientific research, for example, to get a PhD, needs a lot of resources, both human and technical, to finish it successfully. The whole process of scientific research can be divided into five main stages:

1. Formulation of the topic and planning of the research.
2. Review of literature and development of methodology.
3. Data collection and analysis.
4. Writing and editing of the dissertation.
5. Finalization of the submission and defense of the thesis.

The principles for implementing each stage have changed significantly during the digital transformation process. By 2022, various Internet resources were available to graduate students to assist them in conducting their own research. Due to the rapid development of generative AI technologies at the end of 2022, the use of AI in scientific research became a new challenge, especially for young scientists conducting dissertation research.

**Problem statement.** Today, the question of defining and using methods and approaches for integrating AI into the graduate students' activities remains open (1). An important question also remains whether AI can serve as a tool for collaboration and co-creation. Liu (2) proposes the human-AI co-creation framework and notes that AI-assisted design can reduce cognitive load, increase the fluidity of idea generation, and inspire new directions, which is also consistent with the #ppAI6 model developed by Septiani et al. (3) and based on the Romero framework (3).

**The goal of this work** is to understand the current state of researchers' use of AI tools to improve not only the speed of research but also its quality.

**Main part.** The research used general scientific methods (analysis of the scientific literature) and empirical methods (observation, surveys). To formulate the main conclusions presented below, the responses of 18 participants in an online survey conducted for Ukrainian graduate students and PhDs who recently completed their research (in various scientific fields) were analyzed and summarized. The level of researchers' involvement in the use of AI tools in the scientific research process was assessed using self-assessment questionnaires.

The survey found that 61.1% of respondents consider themselves sufficiently knowledgeable about the potential of using AI tools to intensify postgraduate research. Participants generally note that the use of AI-based tools is appropriate at every stage of postgraduate research, with 61.1% using them several times a month and 22.2% several times a week.

The survey was used to compile a list of AI tools that respondents most often use in their postgraduate research.

It is important to note that among responses to the question about the use of popular AI tools in the research process, some participants indicated they did not use the proposed applications in their activities or were unaware of them. Most of these responses were related to stages 1, 3, and 5.

It is possible that this is due to the fact that the majority of respondents (83.3%) have not yet completed their postgraduate research. At the same time, the survey results showed that 72.2% of respondents believe that the use of AI tools increases the effectiveness of their research activities. In addition, they noted that they feel the need for additional training and coaching on the effective use of AI tools for postgraduate research.

Table 1

**AI tools application in the research stages**

| Stage | Stage description | Functions of AI tools | AI tools |
|---|---|---|---|
| 1 | Justification of the relevance of the research, definition of the components of the research, and development of the initial plan | Semantic search, summarization, gap detection, and automated generalization | Semantic Scholar, Elicit, Perplexity (Anara) |
| 2 | Gap identification, research methodology development, and experimental design | Semantic search, synthesis of data from multiple sources, answers to questions with citations, citation management | Notebook LM, Paperpile, Paperpal, Perplexity. |
| 3 | Implementation of the research plan through data collection and drawing conclusions based on their analysis | No-code data analysis, visualization, modeling, and automated analytics | Powerdrill AI, Tableau, Perplexity (Julius AI) |
| 4 | Formatting the thesis in the form of a coherent, logical, and academically coherent text | Formatting the research work in the form of a coherent, logical, and academically coherent text | Grammarly, QuillBot, Perplexity (Yomu AI) |
| 5 | Final checks of the thesis and preparation for the defense | Checking the thesis before submission (language, technical parameters), checking for plagiarism | Scribbr, Perplexity (Paperpal, ProWritingAid) |

**Conclusions.** Despite the consensus on the need to integrate AI tools into the postgraduate research process in order to intensify and scale up this type of activity, respondents differed in their views on several key issues. The first of these was the question of the forms of AI tool integration: about a third of respondents believe that AI will become an important addition to traditional methods, another third believe that AI will radically transform the forms of research, while the last third hesitate to give a clear answer to this question. When asked about the possibility of creating Human-AI Co-Creation Content, participants were almost evenly divided: 38.9% considering such a scenario highly likely, while 38.9% considered it minimally likely. The remaining 22.3% are hesitant to answer. This may mean that researchers are still unsure whether AI can be used as a tool for content co-creation. In addition, key challenges remain in authorship clarity (2), and ethical use of such content is also uncertain. These survey results indicate general interest in the use of AI tools in the process of postgraduate research. However, respond cautiously to questions related to predicting the characteristics of postgraduate activity transformation under the influence of AI.

That is why it is important to develop a clear vision of how scientific research will transform in the context of rapid digital transformation and AI.

## References


1. Fotova Čiković, K., Mandić, A. i Hoić, M. (2025). Artificial Intelligence vs. Traditional Research Methods: An Empirical Study from Northern Croatia. Tehnički glasnik, 19, 1, 88-93. https://doi.org/10.31803/tg-20241113001849
2. Liu, Z. (2025). *Human-AI Co-Creation: A Framework for Collaborative Design in Intelligent Systems* (arXiv:2507.17774). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17774.
3. Septiani, D. P., Kostakos, P., & Romero, M. (2023). Analysis of Creative Engagement in AI Tools in Education Based on the #PPai6 Framework. In Z. Kubincová, F. Caruso, T. Kim, M. Ivanova, L. Lancia, & M. A. Pellegrino (Eds.), *Methodologies and Intelligent Systems for Technology Enhanced Learning, Workshops - 13th International Conference* (Vol. 769, pp. 48-58). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42134-1_5.

# DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HYBRID SCIENCE GATEWAY FOR INTEGRATING WEB FRAMEWORKS WITH PARALLEL COMPUTATIONAL CORES

**Leshko R., Popovych A., Holskyi V., Stolyarchuk I.**
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Drohobych, Ukraine

**Abstract**. The authors' analysis of modern scientific computing requirements highlights the need for accessible high-performance computational (HPC) tools. This paper proposes the architectural design of a hybrid Science Gateway that seamlessly integrates a modern PHP-based web framework (Laravel) with a high-performance Python computational core. The containerized Docker environment allows for the real-time execution of highly parallelized physical simulations, specifically the calculation of energy spectra for quantum nanostructures using the Luttinger Hamiltonian. It was found that utilizing Just-In-Time (JIT) compilation and MPI for matrix generation significantly reduces the calculation time, enabling synchronous and asynchronous web-based scientific experiments without compromising the accuracy of the computational processes.

**Keywords**: Science Gateway, Hybrid Architecture, Parallel Computing, Web Framework, Quantum Dot, MPI, JIT Compilation, Docker.

**Introduction**. Currently, to intensify the study of quantum mechanical phenomena in nanostructures, most research is focused on utilizing High-Performance Computing (HPC) clusters. However, access to such clusters and the complexity of configuring mathematical software environments (MPI, SciPy, Numba) create high barriers to entry for researchers and students [1-5]. A feature of modern scientific investigations is the transition towards Science Gateways—web-oriented platforms that hide the complexity of the computational backend behind a user-friendly interface. This scientific and applied problem is solved by providing a reliable software bridge between web-routing technologies and heavy mathematical backends, ensuring that the calculation time and resource allocation do not exceed server limitations during large-scale matrix diagonalizations.

**The purpose of the work** is to develop the architectural criteria and embedded tools for implementing a hybrid, containerized Science Gateway that integrates a web framework with a parallel computational core for real-time nanostructure energy spectra analysis.

**Formulation of the problem**. Analysis of web-based scientific tools allows us to state the following: during the execution of highly intensive tasks, such as generating and diagonalizing a large plane-wave basis matrix for a 3D quantum dot, the web server must handle long-running processes without timing out, while strictly isolating the computational dependencies from the web logic.

**Solving the problem**. Solving the problem. Based on the comparative characteristics of monolithic and microservice architectures, a hybrid Docker-based architecture is proposed. It provides dynamic task execution in an isolated environment with a calculation error that strictly depends on the chosen physical basis.

To implement such an approach, it is first necessary to synthesize a unified containerized infrastructure that supports both the web runtime (PHP-FPM/Nginx) and the scientific environment (Python, C++ compilers, OpenMPI).

If we consider the generation of the Hamiltonian matrix elements in the basis of plane waves, the computational complexity scales significantly. The integration algorithm triggers the computational core, which calculates the matrix elements:

$$H_{m_1,m_2}(\vec{k_i},\vec{k_j})=T_{m_1,m_2}(\vec{k_i},\vec{k_j})+V(\vec{k_i}-\vec{k_j})\delta_{m_1,m_2}, \quad (1)$$

where $T$ represents the kinetic energy operator derived from the Luttinger parameters, and $V$ is the confinement potential of the quantum dot.

For a given cutoff basis size, the matrix generation and diagonalization dependencies are optimized using Numba JIT compilation and parallelized via MPI threads. The architectural data flow is shown in Fig. 1.

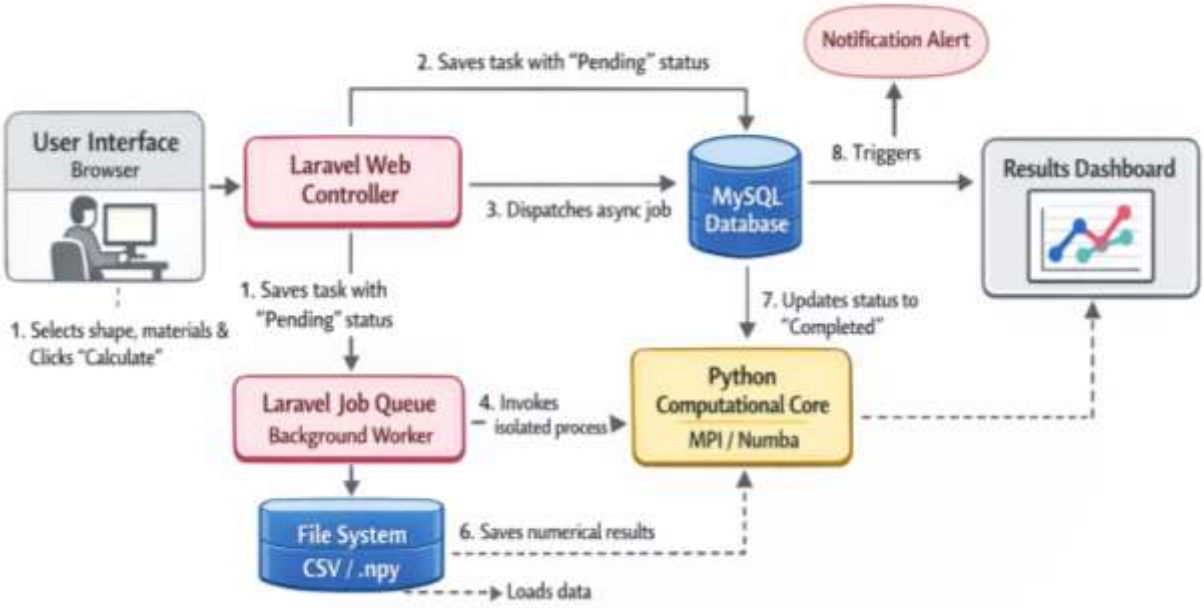



Fig. 1. Block diagram of the hybrid Science Gateway data flow

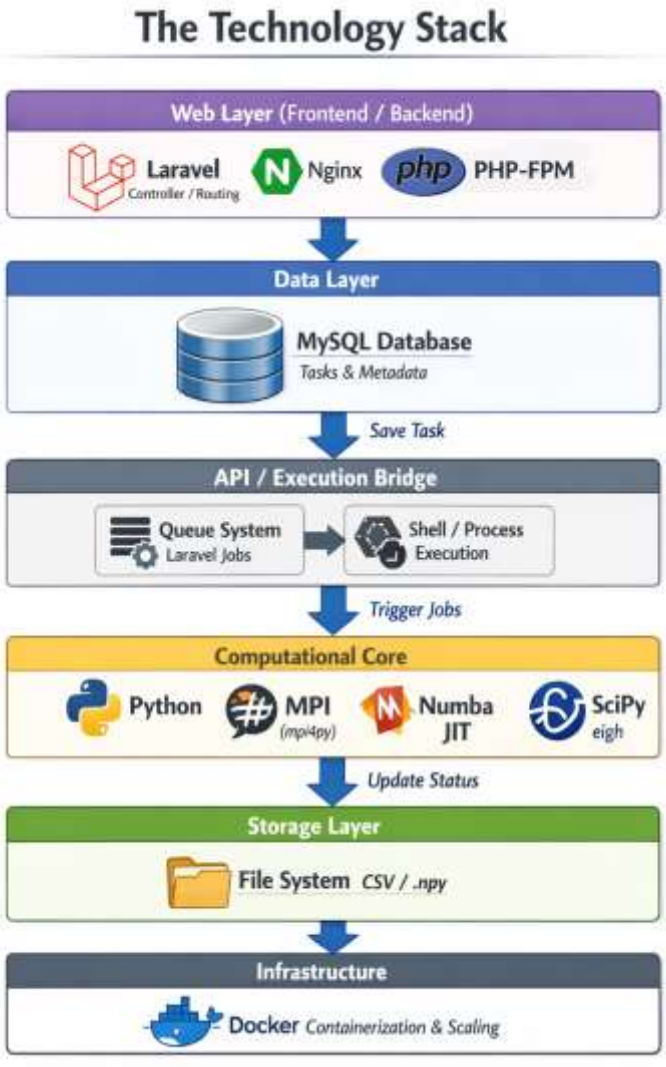



Fig. 2. The technology stack

**Conclusion**. The analysis of the main architectural characteristics of web frameworks and scientific computing languages made it possible to propose a criterion, the hardware and software implementation of which provided the synthesis of an adaptive hybrid Science Gateway.

Formulated requirements for the containerized deployment of the Laravel-Python infrastructure are proven to solve the dependency conflict issue inherent to scientific software deployment.

The essential differences of the synthesized gateway are as follows: the first stage – the configuration and scaling of the computational environment are abstracted through Docker; the second stage – the execution of the Luttinger Hamiltonian calculations is carried out in parallel without blocking the main web server threads.

The usage of the advantages of PHP for routing and Python for scientific computing in one integrated tool ensures the implementation of complex dynamic modeling with high reliability. Such hybrid platforms are advisable to use in educational and research institutions where rapid prototyping of physical models is required.

## References


1. Cohen, J., Moxey, D., Cantwell, C., Burovskiy, P., Darlington J., and Sherwin, S. J.: Nekkloud: A software environment for high-order finite element analysis on clusters and clouds. IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), pp. 1-5, (2013). https://doi.org/10.1109/CLUSTER.2013.6702616.
2. Theler, J.: FeenoX: a cloud-first finite-element(ish) computational engineering tool. *Journal of Open Source Software*, 2024, 9(93), P. 5846:1-6. https://doi.org/10.21105/joss.05846.
3. Semenov, S., Tsukur, V., Molokanova, V., Muchacki, M., Litawa, G., Mozhaiev, M., Petrovska, I.: Mathematical Model of the Software Development Process with Hybrid Management Elements. *Appl. Sci*., 2025, 15, P. 11667:1-44. https://doi.org/10.3390/app152111667.
4. Lisniak, A., Prosiana, D.: Development of a Client-Side Web Application for Cloud-Based Finite Element Analysis. *Applied questions of mathematical modelling*. 2025., 8(2), P. 166-171. https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-2-17.
5. Ciliberti, S., Coro, G.: Distributed Environments for Ocean Forecasting: The Role of Cloud Computing. State Planet. 2025, 5-opsr, P. 24:1-12. https://doi.org/10.5194/sp-5-opsr-24-2025.

# THE ASPECTS OF DEVELOPMENT MODERN CRIS SYSTEM FOR UKRAINE

**Lutay L.** [1], **Shapovalov Ye.**[2], **Shapovalov V.**[2,3], **Zharinov S.**[3]
[1]State University "Kyiv Aviation Institute", Ukraine
[2]National Center «Junior Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine
[3]State Scientific and Technical Library of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** This paper presents a systematic approach to developing a modern Current Research Information System (CRIS) for Ukraine through comprehensive field unification and entity identification. The study analyzed 32 regulatory documents across three thematic categories: institution-related (17 documents), project and grant-related (11 documents), and scientist-related (4 documents). Applying dialectical and analytical methods together with Google Sheets and Grist software, 34 distinct entities were identified as appearing more than five times across the regulatory corpus. The most frequently utilized entities were Position of Scientist (955 occurrences), Scientist (785), Patent (627), and Publication (507). The proposed system extends existing international CRIS implementations — NARCIS, SICRIS, Research.fi — by introducing Ukraine-specific entities such as Implementation Act, Expert Evaluation, and Scientific Result, while establishing integration with SCOPUS, WoS, ORCID, PIC, and ROR in full compliance with FAIR principles. The results lay the groundwork for eliminating manual duplicate data entry and enabling automated scientific reporting at the national level.

**Keywords:** CRIS, research information management, field unification, entity identification, scientific reporting automation, URIS, FAIR principles, Ukrainian science infrastructure, database architecture, bibliometric analysis

**Introduction.** Contemporary research governance depends on a robust information infrastructure for collecting, structuring, and analysing scientific data at national and institutional levels. Current Research Information Systems (CRIS) have emerged as essential tools for this purpose, with notable implementations in the Netherlands (NARCIS), Slovenia (SICRIS), and Finland (Research.fi). NARCIS integrates structured data from universities and funding agencies with unstructured web data to provide a comprehensive view of Dutch research output. SICRIS maintains data on researchers, groups, projects, and organisations in Slovenia, while Research.fi covers Finnish publications, projects, funding opportunities, infrastructures, and organisations. Despite these achievements, all existing systems share a common limitation: they rely heavily on manual input of duplicate fields and lack a formalised concept of field unification. For Ukraine, where scientists frequently hold multiple concurrent institutional positions and where scientific reporting is governed by a dense regulatory framework, this limitation is especially acute. The State Scientific and Technical Library of Ukraine is developing URIS — the National Electronic Scientific Information System — to address these challenges. Building a reliable URIS requires a rigorous analysis of existing regulatory documentation and the derivation of a unified data model that can automate reporting and ensure interoperability with global scientific databases.

**Work goal.** To develop a unified field structure and entity taxonomy for a full-scale CRIS tailored to Ukrainian scientific reporting requirements, with a scalable methodology applicable to other countries seeking to modernise their research information infrastructure.

**Problem statement.** Ukrainian scientific reporting is governed by 32 regulatory documents that define overlapping data requirements across institutions, projects, and individual researchers. Without a unified field model, significant effort is duplicated in data entry, reporting contains inconsistencies, and automated cross-system verification is impossible. Existing international CRIS implementations do not accommodate Ukrainian-specific entities such as the Position of Scientist (required because Ukrainian academics regularly hold multiple simultaneous affiliations), the Implementation Act (a formal record of applied research outcomes), or Expert Evaluation (a statutory assessment procedure for research institutions). The challenge is therefore to derive a comprehensive, formally defined entity model from the existing regulatory corpus that is both

complete with respect to Ukrainian practice and compatible with international interoperability standards.

**Main part.** The research methodology combined dialectical scientific cognition with abstract-logical, synthesis, comparative, and statistical methods. All 32 regulatory documents were categorised into three groups: institution-related (17, primarily certification and assessment forms such as 'Card of expert evaluation of a HEI in a scientific direction' and 'Form P2: Information on scientific and scientific-pedagogical staff'), project/grant-related (11, covering registration, assessment, and accounting, including 'The Card of the Basic Research Project' and 'Annotated report on completed fundamental scientific research'), and scientist-related (4, governing degree and title award procedures under Cabinet Resolution No. 567 and MES Order No. 13). Fields were extracted into a base table with four column groups: document reference, basic field usage per entity, calculation and aggregation function identification, and required entity relationships. Google Sheets facilitated initial field alignment and pivot-table aggregation, while Grist enabled advanced multi-value classification via its Reference List function, allowing cells to store multiple entity links and automated population via lookup tables. Google Data Studio dashboards tracked field completion status throughout the process. An entity was defined as a real or imaginary database object unified on the basis of its subject-area essence. Thirty-four entities meeting the five-occurrence threshold were identified, including Scientist, Equipment, Department, Publication, Project, Institution, Expert Evaluation, Scientific Result, and Position of Scientist. The Position of Scientist emerged as the most referenced entity (955 occurrences) specifically because Ukrainian scientists commonly hold several positions simultaneously, making affiliation calculation inherently institutional rather than simply personal. Semantic analysis of document text confirmed that 'project', 'number', 'institution', 'scientific', 'results', and 'research' dominate the regulatory vocabulary, with SCOPUS appearing prominently as a primary evaluation metric. A distinctive architectural contribution is the formalised linkage between Scientific Result and Research Infrastructure.

**Conclusions.** The study successfully derived a unified database structure of 34 primary entities with detailed field specifications grounded in the full corpus of Ukrainian scientific regulatory documentation. The proposed CRIS architecture resolves critical gaps in existing international systems by incorporating Ukraine-specific entities and administrative relationships not present in NARCIS, SICRIS, or Research.fi. The methodology — systematic regulatory document analysis combined with structured field unification tools — is explicitly designed for international scalability, providing a replicable approach for any country seeking to build or modernise national research information infrastructure. Practical implementation of URIS will require integration with SCOPUS, WoS, ORCID, PIC, ROR, EDR, and EDEBO following FAIR principles, and future research will focus on linguistic refinement of field terminology through expert consultation and detailed specification of entity relationships for technical implementation.

## References


1. Hogenaar, A., Van Meel, M., Dijk, E.: What are your information needs? Three user studies about research information in the Netherlands, with emphasis on the NARCIS portal. ELPUB, pp. 290–303 2010. https://elpub.architexturez.net/doc/oai-elpub-id-120-elpub2010
2. Smirnova, V.: Research on Open Digital Information Systems for Analysis of Research Activity Results of HEI Academic Staff. Open Educational E-Environment of Modern University, no. 9, pp. 134–144 (2020). DOI: 10.28925/2414-0325.2020.9.11
3. Nikkanen, J., Puuska, H.-M.: Researchers' profiles in the Finnish Research Information Hub. Procedia Computer Science, vol. 211, pp. 206–210 (2022). https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.10.193
4. Shapovalov, Y. B., Shapovalov, V. B., Zharinova, A. G., et al.: An Academic Events Sub-system of the URIS and Its Ontology Representation. 3rd Edge Computing Workshop, pp. 130–140 (2023). https://ceur-ws.org/Vol-3374/paper10.pdf
5. Mallig, N.: A relational database for bibliometric analysis. Journal of Informetrics, vol. 4, no. 4, pp. 564–580 (2010). https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.06.007
6. Zharinov, S.: The role of the library in the digital economy. Information Technology and Libraries, vol. 39, no. 4, pp. 1–17 (2020). https://doi.org/10.6017/ital.v39i4.12457

# TAXONOMIC ANALYSIS OF PROFESSIONAL COMPETENCIES ASSESSMENT IN DISTRIBUTED PROJECT MANAGEMENT ENVIRONMENTS

**Neroda T., Ivaskiv R.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract**. The limitations of linear models in modern project management information systems, which fail to account for the dynamics of competencies relative to specific tasks, are examined. An automated, unbiased mechanism for identifying and selecting candidates within a creative media platform is proposed. This mechanism mitigates the influence of the subjective factor on project team formation by operating on the "many-to-many" paradigm, where a performer interacts simultaneously with a multitude of media objects and other project participants. The structure of a Digital User Passport is developed, providing multi-level integration of professional competencies. Each competency is represented as an atomic taxonomic term with a weight coefficient [**0,1**], reflecting the proficiency level and subject to dynamic adjustment based on user activity. Semantic links between competencies are formalized through a thesaurus, which accounts for skill kinship and enhances the accuracy of candidate identification, even in cases of incomplete query matching.

**Keywords**: project management systems, teamwork, creative media platform, professional competencies, taxonomic analysis, semantic thesaurus, expertise formalization methods.

**Introduction**. The growing complexity of project activities necessitates the implementation of specialized software intended for work planning, resource support organization, and task execution monitoring. Systems of this class provide an array of tools for scheduling, budgeting, cost control, and documentation support, thereby minimizing operational error risks. In addition to strictly accounting functions, these environments integrate communication and collaborative tools, facilitating informed decision-making and compliance with quality and time management standards. Despite their robust functionality, most existing systems rely on a linear "one-to-one" interaction model, characterized by rigidly deterministic and hierarchical links between management subjects and objects. Such architecture significantly constrains flexibility within dynamic creative environments, which require intensive multi-vector communication.

An analysis of contemporary research indicates increasing attention toward the automation of project management activities and the integration of artificial intelligence methods into software development administration systems. In [1], the application of machine learning algorithms in agile management for predicting project execution parameters and supporting decision-making is examined; however, insufficient attention is paid to mechanisms for objective project team selection. Models for predicting task deadline violations are investigated in [2] based on historical project activity data. Researchers in [3] analyze the transformation of project management systems under the influence of artificial intelligence technologies, noting a gradual transition from accounting tools to intelligent systems for supporting management decisions. The study [4] is devoted to the use of cloud-based documentation services and the analysis of user interaction with centralized information resources. In the proceeding [5], approaches to project analytics based on machine and deep learning are considered, specifically tasks related to resource assessment, risk forecasting, and work execution control.

Despite these and other numerous developments in the field of project management support information systems [6, 7], contemporary scientific and practical publications demonstrate a range of limitations. In the majority of systems, the selection of performers is carried out based on the subjective decision of a project manager or formal qualification attributes, which fails to account for the dynamics of competencies, participant interaction, and the relevance of experience to specific tasks. Furthermore, there are constraints in the instrumentation for integrating academic library resources and corporate knowledge bases into the processes of team selection and coordination, which limit the possibilities for timely access to relevant content and reduce the potential for building the intellectual capital of participants. Therefore, developing models to overcome the subjective factor in project team formation within a comprehensive media platform, in accordance with the specific nature of creative industries, is both timely and relevant.

**The purpose of the work** is the construction and implementation of an automated, unbiased mechanism for the identification and selection of candidates within a creative media platform. The proposed approach is based on the "many-to-many" concept as a communication paradigm where the subject (user), as an active entity of the platform, interacts with a multitude of media objects and other subjects simultaneously [8], necessitating fundamentally new methods of expertise formalisation.

**Formulation of the problem**. To implement automated selection within a distributed environment, the problem of determining a source of objective data regarding a potential candidate's competencies arises. Within the media platform, the Digital User Passport (DUP) is defined as such a source. The task consists of designing a DUP structure that allows for the unambiguous identification of a subject's expertise without the need for direct expert assessment at the search stage.

**Solving the problem**. Completed research has shown that the optimal structure of the Digital Passport should include several levels of data formation. At the integration level, automatic connection and aggregation of data from external professional and scientific profiles (ORCID, GitHub, etc.) take place, ensuring the verification of the academic background and real development experience. The initial population of competency data is performed by the user at the declarative level during registration, which includes self-assessment of competencies and the definition of professional interest vectors. Subsequently, the activity level demonstrates the dynamics of "digital footprint" accumulation within the platform, recording the success of task execution in previous projects and the activity of interaction with media environment objects. Results of periodic competency surveys, which allow for the updating of skill statuses and accounting for the factor of their natural obsolescence, are aggregated at the correction level. Thus, the formation of the DUP within an integrated multi-user media platform for team project support is viewed as an iterative process: transitioning from subjectively provided data during registration to a high-precision profile where every indicator is verified by activity within the system.

The problem of formalizing target expertise within such a structure requires the application of set theory and vector analysis for subsequent alignment of a user’s profile with the requirements of a specific project. The process of implementing a creative idea within the media platform is considered as a sequential decomposition into a set of ordered stages $E$, each characterized by a specific set of technological and creative tasks. The formalization of requirements for each stage is performed through the projection of the necessary professional characteristics onto the structure of a potential performer. As noted, such a projection can be represented as a tuple of instances of the involved competencies, reflecting the subject’s ability to perform the specified operations within a given temporal and resource interval [8]. In the proposed model, each competency $K$ is defined as an atomic term of a hierarchical taxonomy encompassing the project’s subject domain. This approach allows transforming an abstract description of qualifications into a structured array of identifiers suitable for automated processing.

Each taxonomy term within the Digital User Passport is assigned a weight coefficient in the range of [**0, 1**], representing the level of mastery of the corresponding skill. The initial value, established based on declarative data, is subject to continuous adjustment through the analysis of the subject's "digital footprint". This ensures dynamic profile updates: successful task execution, repository activity, or positive results from verification surveys increment the competency weight, whereas a prolonged absence of practical skill application initiates its gradual decrement. To ensure system flexibility and account for indirect experience, a thesaurus of interconnected terms is utilised. It establishes semantic links and degrees of relatedness between different taxonomy categories, enabling the system to interpret the proximity of skills (Fig. 1). To formalize the process of automated candidate selection within the media platform, the apparatus of vector algebra is applied, enabling the translation of qualitative professional characteristics into quantitative indicators suitable for algorithmic processing. The mathematical model is based on representing the requirements of a specific project stage and the user’s professional profile as vectors in a multidimensional competency space. The number of dimensions $n$ in this space is determined by the total number of unique terms recorded in the adopted taxonomy. Accordingly, each competency serves as a separate coordinate axis, and the level of proficiency determines the position of the vector in the space.

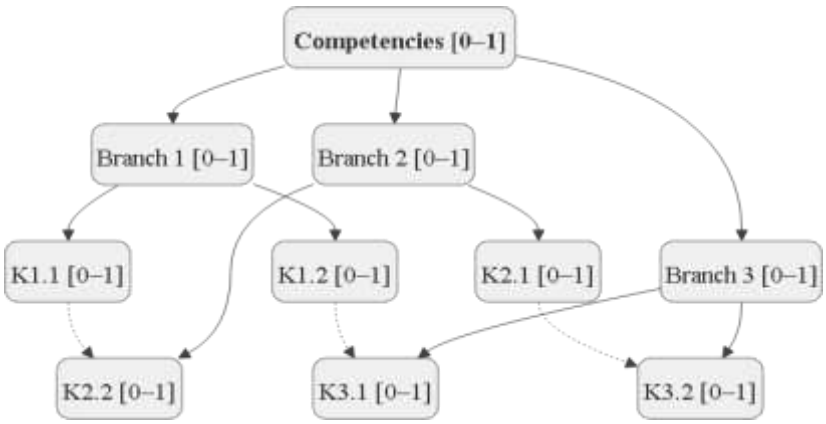



Fig. 1. Taxonomic organisation of semantic links in the competency model

The requirements of a project stage are described by a vector $V_P = \{K_{P1}, K_{P1}, \dots K_{Pn}\}$ , where each component $K_{Pi}$ corresponds to the required level of proficiency $i$-th competency for the successful completion of the stage's tasks. Component values range from [0, 1], where 0 indicates no need for the skill, and 1 indicates a requirement for the maximum level of qualification. Similarly, the structure of the User Digital Passport is formalized as a vector $V_U = \{K_{U1}, K_{U2}, \dots , K_{Un}\}$, where values $K_{Ui}$ reflect the current state of the subject's professional expertise, formed based on the integration of declarative data, survey results, and analysis of the subject's "digital footprint."

**Conclusion**. Thus, the justified architectural principles and mathematical apparatus for automating the formation of project teams within the presented creative media platform, unlike existing project management systems, enable the formalization of professional competencies through the structure of a multi-component User Digital Passport, which integrates declarative data with an objective "digital footprint" and dynamic verification results, ensuring the transition from a formal qualification description to a high-precision specialist profile. The deployment of the developed model within the "many-to-many" communication paradigm creates conditions for the automatic self-purging of the database from outdated information and supports the formation of effective creative teams oriented toward results. Future research will focus on the development of algorithms for the automatic generation of verification questionnaires to refine competency vector coordinates in real time.

## References

1. Pérez-Castillo Y. J., Orantes-Jiménez S. D., Letelier-Torres P. O. A systematic literature review on machine learning applications for agile project management. Ingeniería, Investigación y Tecnología. 2024. Vol. 25, No. 3. DOI: 10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.017.
2. Mahdi M. N., et al. Design and Development of Machine Learning Technique for Software Project Risk Assessment - A Review," Information Technology and Multimedia, 2020, pp. 354-362, DOI: 10.1109/ICIMU49871.2020.9243459.
3. Nenni M. E., De Felice F., De Luca C., Forcina A. How artificial intelligence will transform project management in the age of digitization: a systematic literature review. Management Review Quarterly. 2025. Vol. 75. P. 1669–1716. DOI: 10.1007/s11301-024-00418-z.
4. Uddin S., Yan S., Lu H. Machine learning and deep learning in project analytics: methods, applications and research trends. International Journal of Production Research. 2024. Vol. 62. No. 3. P. 873–892. DOI: 10.1080/09537287.2024.2320790.
5. Project Management Ticket Category Classification Using Machine Learning Method: A Comparative Study. Proceedings of the 2024 International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics System (AIMS 2024). IEEE, 2024. DOI: 10.1109/AIMS61812.2024.10512660.
6. Nam D., Macvean A., Myers B. A., Vasilescu B. Understanding Documentation Usage Through Log Analysis: An Exploratory Case Study of Four Cloud Services. ICSE. 2024.
7. Pérez-Piqueras V., Bermejo P., Gámez J. A. Intelligent support for agile release planning: an empirical evaluation of ProjectION. Automated Software Engineering. 2026. Vol. 33. Article 49. DOI: 10.1007/s10515-026-00591-3.
8. Neroda T. Ivaskiv R. Designing the Integrated Multi-User Media Platform for Educational and Scientific Research Support: Activating of student cognitive activity through team work in academic library creative space. Computer science and information technologies, 2019. Vol. 3.. P. 39-43. DOI: 10.1109 / STC-CSIT.2019.8929880

# CORPUS AND CONTENT ANALYSIS OF SUGGESTION IN DIGITAL PROPAGANDA ON SOCIAL MEDIA

**Palchevska O.[1], Aleksandruk I.[2], Luchyk A.[3], Hubych P.[1]**
[1]Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[3]National University of Kyiv Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine.

**Abstract.** This study examines suggestion as a latent mechanism of influence in digital propaganda, particularly in bilingual Ukrainian- and English-language social media discourse related to the Russian-Ukrainian war, civil protection, security, and crisis communication. The pilot material consists of publicly available posts and comments from Telegram channels, X (Twitter), TikTok, and YouTube, selected for testing a combined corpus-and-content analysis procedure. The study argues that suggestion operates through repetition, emotionally marked vocabulary, metaphorical and archetypal framing, binary oppositions, threat narratives, keyword salience, and network amplification. The methodological framework combines corpus analysis in Sketch Engine, content and network analysis in Communalytic, and an author-developed Digital Suggestion Index (DSI) based on weighted feature extraction. The proposed approach supports the preliminary identification of manipulative messages, coordinated dissemination, recurrent propaganda frames, and suggestive linguistic patterns.

**Keywords:** suggestion; digital propaganda; computational propaganda; detection algorithms; feature extraction; corpus analysis; content analysis; sentiment analysis; network amplification; information disorder.

**Introduction.** In the contemporary digital information environment, suggestion functions as a latent mechanism of influence aimed not only at informing the recipient but also at shaping emotions, evaluative judgments, and behavioural readiness. In propaganda discourse, suggestion is realized through repetition, hyperbole, emotionally marked vocabulary, metaphors, oppositions between "us" and "them," information overload, archetypal images, and rhythmic organization of messages. These devices reduce critical distance and encourage the audience to accept ideologically framed interpretations as natural or self-evident. Recent research on disinformation and propaganda detection demonstrates that suggestive influence should be studied as a hybrid phenomenon involving text, user behaviour, platform affordances, and networked amplification [1], [2], [3]. In this context, propaganda is not limited to the verbal content of messages: it also depends on technological mechanisms of dissemination, including automated or coordinated accounts, recommendation systems, cross-platform circulation, and interaction networks. Therefore, digital suggestion should be interpreted as the interaction of linguistic manipulation, emotional framing, semantic salience, and algorithmic visibility.

**Formulation of the Problem.** The key research problem lies in the difficulty of detecting suggestive influence in digital propaganda because it operates simultaneously at several levels: linguistic, semantic, narrative, emotional, and technological. Traditional qualitative discourse analysis can reveal ideological meanings and manipulative strategies, but it is insufficient for processing large-scale social media data. At the same time, purely computational models may identify suspicious patterns but do not always explain their communicative, pragmatic, and ideological functions. Thus, there is a need for an interdisciplinary model that combines corpus linguistics, content analysis, discourse analysis, computational social science, and machine-learning-based detection. This need is especially important for Ukrainian- and English-language digital discourse, where war-related propaganda, crisis narratives, and security terminology circulate across Telegram, X, TikTok, and YouTube. Recent multilingual and social-media-oriented studies show that propaganda detection benefits from annotated corpora, interpretable linguistic features, hybrid feature engineering, and platform-aware analysis [4], [5], [6].

**Purpose of the Work.** The purpose of this work is to develop an analytical framework for identifying, interpreting, and preliminarily detecting suggestive mechanisms in digital propaganda discourse. The study combines corpus analysis with the help of Sketch Engine, content and network

analysis with the help of Communalytic, and computational modelling in order to reveal how suggestive propaganda is linguistically encoded, algorithmically amplified, and circulated in Ukrainian- and English-language social media communication. The empirical testing is based on a pilot corpus of public posts and comments from Telegram, X (Twitter), TikTok, and YouTube concerning war, security, emergency response, and civil protection topics.

**Solving the Problem.** To make the analysis more operational, the study adapts the logic of the multifactor model proposed by Dats et al. [7], who apply the linear convolution method to calculate a generalized level of propaganda in texts. In the present study, this logic is reformulated for digital propaganda discourse as the Digital Suggestion Index (DSI). The DSI is understood as a preliminary heuristic score rather than a universal measurement of propaganda. Each parameter is normalized on a 0–1 scale, where 0 indicates the absence of a feature and 1 indicates its high concentration in a text or message cluster.

The proposed formula is:

$$DSI = 0.15R + 0.20E + 0.15M + 0.15B + 0.15T + 0.10K + 0.10N,$$

where $R$ denotes repetition of keywords, slogans, constructions, or hashtags; $E$ denotes emotionally marked and evaluative vocabulary; $M$ denotes metaphorical or archetypal framing; $B$ denotes binary opposition, including "us/them" polarization; $T$ denotes threat narrative and fear appeal; $K$ denotes keyword, collocation, and semantic-prosody salience measured by corpus tools; and $N$ denotes network amplification, including repost intensity, account coordination, and concentration of dissemination. The coefficients are preliminary expert weights whose sum equals 1.00. Emotional vocabulary receives the highest preliminary coefficient because affective loading is treated in this study as one of the most direct linguistic markers of suggestive influence. The proposed weights may be recalibrated after manual annotation, inter-annotator agreement testing, and comparison with empirically observed propaganda datasets.

The proposed model makes it possible to combine quantitative and qualitative approaches. Corpus analysis identifies statistically salient markers in Ukrainian and English texts; content analysis explains their ideological and communicative functions; and computational formulas help organize the detection procedure. Sketch Engine is used for keyword extraction, collocation profiling, concordancing, and semantic-prosody analysis, whereas Communalytic is used for platform data preparation, sentiment/topic analysis, and network visualization. These tools help distinguish suggestive propaganda from more neutral discourse and identify high-risk message clusters for further qualitative interpretation [8], [3].

At the same time, the model should be treated as an applied heuristic tool rather than a universal measurement of propaganda. Its reliability depends on the quality of the corpus, the accuracy of annotation, the validity of thematic dictionaries, and the selection of features. Therefore, computational results must always be interpreted in the context of discourse, platform dynamics, communicative intention, and socio-political conditions.

**Conclusion.** Suggestion in digital propaganda should be studied as a hybrid phenomenon that combines linguistic manipulation, emotional framing, narrative construction, algorithmic amplification, and networked dissemination. The integration of corpus analysis, content analysis, and computational detection models makes it possible to move from the description of isolated manipulative devices to the identification of systemic mechanisms through which propaganda narratives are produced, circulated, amplified, and normalized.

The practical value of the proposed approach lies in its applicability to social media monitoring, information security, media literacy, and discourse analysis. The adapted Digital Suggestion Index may be used as a complementary method for the preliminary detection of suggestive propaganda in Ukrainian- and English-language posts and comments from Telegram, X, TikTok, and YouTube. Computational indicators function as instruments that help identify high-risk texts for further qualitative analysis, while the final interpretation remains dependent on discourse context, platform dynamics, communicative intention, and socio-political conditions.

## References


1. Ahmad, P. N., Yuanchao, L., Aurangzeb, K., Anwar, M. S., & Haq, Q. M. ul. (2024). Semantic web-based propaganda text detection from social media using meta-learning. Service Oriented Computing and Applications. https://doi.org/10.1007/s11761-024-00422-x
2. Khanday, A. M. U. D., Wani, M. A., Rabani, S. T., Khan, Q. R., & Abd El-Latif, A. A. (2024). HAPI: An efficient hybrid feature engineering-based approach for propaganda identification in social media. PLOS ONE, 19(7), e0302583. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302583
3. Rastogi, S., & Bansal, D. (2022). Disinformation detection on social media: An integrated approach. Multimedia Tools and Applications, 81, 40675-40707. https://doi.org/10.1007/s11042-022-13129-y
4. Duaibes, L., Jaber, A., Jarrar, M., Qadi, A., & Qandeel, M. (2024). Sina at FigNews 2024: Multilingual datasets annotated with bias and propaganda. In Proceedings of the Second Arabic Natural Language Processing Conference (pp. 640-645). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2024.arabicnlp-1.69
5. Hasanain, M., Ahmad, F., & Alam, F. (2024). Can GPT-4 identify propaganda? Annotation and detection of propaganda spans in news articles. In Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024) (pp. 2724-2744). ELRA and ICCL. https://aclanthology.org/2024.lrec-main.244/
6. Salman, M. U., Hanif, A., Shehata, S., & Nakov, P. (2023). Detecting propaganda techniques in code-switched social media text. In Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (pp. 16794-16812). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-main.1044
7. Dats, I., Gavrilenko, O., & Feshchenko, K. (2025). Determining the level of propaganda in opera librettos using data mining and machine learning. System Research and Information Technologies, 2, 81-97. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.2.05
8. Gruzd, A., & Mai, P. (2026). Communalytic: A no-code computational social science research platform for studying online communities and public discourse on social media. https://communalytic.org/

# SINGLE-ENVIRONMENT OBSTACLE SEVERITY RANKING WITH ESP32-S3 WI-FI SENSING

**Pavlenko V.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract**. Indoor environments already rely on commodity Wi-Fi infrastructure, which has made low-cost embedded Wi-Fi sensing a practical branch of wireless sensing research. Within that setting, one ESP32-S3 setup was evaluated for whether it can preserve a stable obstacle-severity ranking inside one controlled indoor environment without claiming generalized obstacle recognition[1]. The dataset contains 18,000 packets from 12 runs and four static scenarios at the same 2.0 m distance: empty space, closed door, one wall, and two walls. The main claim is restricted to this equal-distance protocol. In that setting, both RSSI medians and run-level CSI summaries keep the same order in all three runs: empty space, closed door, one wall, and two walls. Relative to empty space, the median run-level CSI mean falls to 4.9% for the closed-door case, 1.4% for one wall, and 0.7% for two walls. A grouped leave-one-run-out classifier over 50-packet windows reaches 93.6% accuracy and 0.936 macro-F1 on the equal-distance four-class task; all 23 errors are one-step confusions between one wall and two walls. The supported claim is therefore local severity ranking in one environment, not generalized obstacle-recognition performance. That bounded result can serve as a baseline for later cooperative Wi-Fi sensing.

**Keywords**: Wireless LAN (IEEE 802.11); Channel state information; Received signal strength indicator; Embedded systems; Machine learning; Verification and validation.

**Introduction.** Indoor environments worldwide already depend on commodity Wi-Fi infrastructure, and that ubiquity has made embedded Wi-Fi sensing relevant both to real spaces and to commodity wireless sensing research. ESP32-class hardware makes such experiments easy to run, but the evidence becomes scientifically weak when one-room attenuation patterns are overstated as general obstacle recognition. Tan et al. [1] describe commodity Wi-Fi sensing as a mature but still challenge-heavy field whose main difficulties include deployment sensitivity and evaluation rigor. Cominelli et al. [2] show that CSI-based sensing capabilities are real but bounded by measurement conditions and protocol choices. Chen et al. [3] emphasize that cross-domain transfer remains difficult when environment, placement, or population change. Armenta-Garcia et al. [4] show that embedded Wi-Fi platforms are now practical sensing tools, but their evidence must still be interpreted within hardware and setup limits. Related ESP32-S3 ranging results in [5] show that the same low-cost platform can deliver useful bounded indoor evidence while remaining sensitive to geometry and multipath. Together, these results define a consistent boundary for the current sensing question: commodity Wi-Fi sensing is feasible, but its claims must be matched to protocol, environment, and hardware limits. Work goal. Determine whether a controlled indoor setup can preserve a reproducible severity order across static barrier conditions. Problem statement. Keep the supported claim within one indoor environment and treat machine learning only as secondary separability evidence rather than as proof of generalized obstacle recognition. The resulting scope therefore isolates a narrow ranking question and intentionally avoids broad comparison of CSI feature families, dimensionality-reduction paths, or classifier architectures.

**Protocol and ranking boundary.** Data were captured in one indoor measurement session with two ESP32-S3-DevKitC-1 nodes running ESP-IDF v5.5.3 at 20 MHz on channel 11. Packets were transmitted at 250 Hz, with 1500 packets per run. Four static scenarios were recorded in three runs each at a fixed 2.0 m distance: empty space, closed door, one wall, and two walls. For each packet, the CSI magnitude summary is

$$A_{\text{mean}} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\sqrt{I_k^2 + Q_k^2}\,, \tag{1}$$

and all window-level features are derived from RSSI and (1). The ML analysis uses non-overlapping 50-packet windows with leave-one-run-out validation, so all windows from the test run stay outside training.

[1] The paper draws on materials and intermediate results from the project "Intelligent Methods and Tools for Designing Modules for Autonomous Cyber-Physical Systems" (state registration No. 0124U002340, 2024–2028, Lviv Polytechnic National University).

This split reduces leakage risk, because weak partitioning can overstate CSI classification accuracy [6]. The ML task is the equal-distance four-class setting. The supported scope is limited to this bounded ranking question and does not attempt full-spectrum feature benchmarking. Run-level ranking stability was checked with Kendall tau across the three repeated runs so that the main claim reflects repeated order preservation rather than pooled medians alone.

Table 1

**Obstacle scenario summary**

| Scenario | Dist. (m) | Packet RSSI med. (dBm) | Median run CSI mean |
|---|---|---|---|
| Empty space | 2.0 | -36 | 0.6122 |
| Closed door | 2.0 | -44 | 0.0300 |
| One wall | 2.0 | -47 | 0.0084 |
| Two walls | 2.0 | -50 | 0.0045 |

**Quantitative results.** The strongest evidence comes from the equal-distance scenario set. In all three runs, both RSSI and run-level CSI summaries preserve the same order: empty space, closed door, one wall, and two walls. Relative to empty space, the median run-level CSI mean falls to 4.9% for the closed-door case, 1.4% for one wall, and 0.7% for two walls. Table 1 supports the main ranking claim with a single equal-distance scenario set. On the RSSI side, the median run-level mean shifts by -8.1 dBm for the closed-door case, -11.5 dBm for one wall, and -14.7 dBm for two walls relative to empty space. The repeated-run order is fully stable for both rssi_mean and mean_amp_mean, with Kendall tau equal to 1.0 in all three runs.

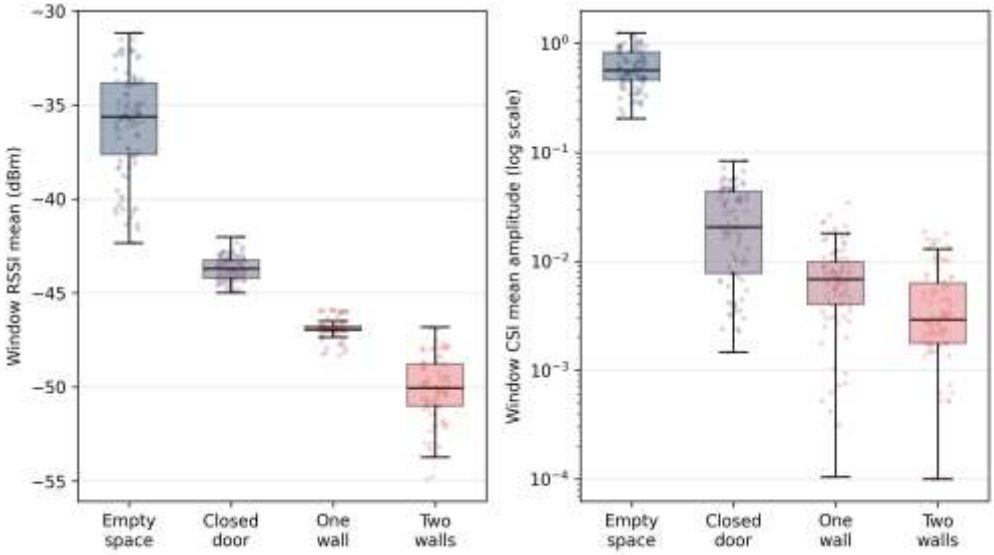



Fig. 1. Equal-distance feature separation

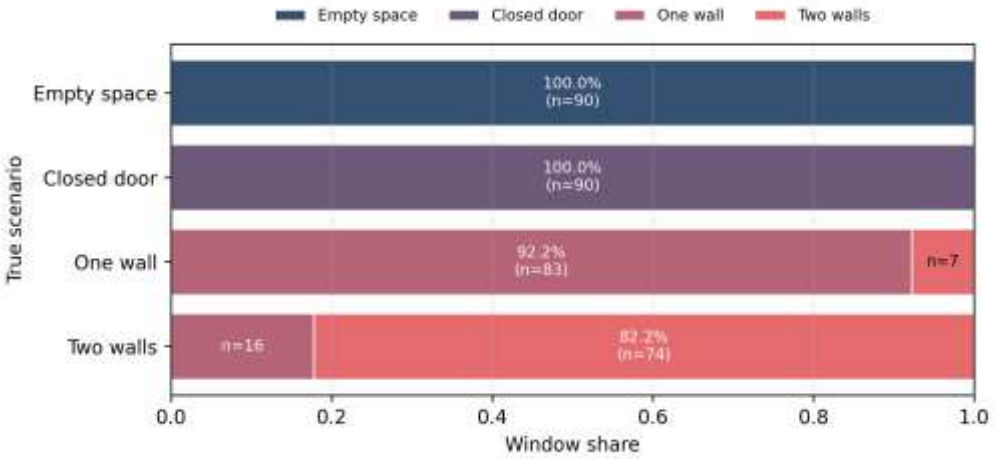



Fig. 2. Equal-distance prediction distribution

Numerically, the equal-distance scenario set shows not only ordinal consistency but also a large attenuation gap between unobstructed and blocked conditions: closed door, one wall, and two walls all remain far below the empty-space baseline in both RSSI and CSI summaries. That pattern matters because

the ordering is reproduced at the run level rather than appearing only after packet pooling, which makes the result more credible as a stable local effect inside the observed geometry.

The grouped ML probe summarizes 360 non-overlapping windows from 12 equal-distance runs and reaches 93.6% accuracy and 0.936 macro-F1 on the four-class task. Figure 1 shows the same class order as the run-level summaries, while Figure 2 shows the class-wise prediction distribution directly: empty space and closed door remain exact, and all observed mistakes stay confined to the one-wall/two-walls boundary. In Fig. 2, $n$ denotes the number of 50-packet windows in the corresponding prediction segment. Each row denotes the true scenario, while segment colors denote the predicted scenario named in the legend. Each class contributes 90 windows; empty space and closed door both reach perfect precision and recall, while one wall and two walls remain the only ambiguous pair with recalls of 92.2% and 82.2%, respectively. The ML result supports bounded secondary separability evidence, while run-level ordinal consistency remains primary. The setup separates light and strong barriers cleanly, but it does not yet support confident discrimination between one wall and two walls under broader conditions.

**Discussion and validity boundary.** The supported claim is intentionally narrow. The results show that one ESP32-S3 setup can preserve a stable local severity order and high grouped classification accuracy for the equal-distance barrier protocol. It does not show geometry-independent attenuation laws, cross-room generalization, or deployment-ready obstacle recognition. It also does not attempt a general comparison of CSI feature spaces, dimensionality-reduction pipelines, or classifier families. The boundary is determined by the single-day single-room capture, one hardware and firmware profile, one channel configuration. That limitation matters because recent temporal-generalization evidence shows that CSI-based sensing quality can drift across time even without obvious environment redesign [7]. Even inside the equal-distance scenario set, all ML errors concentrate at the one-wall versus two-walls boundary, which means the current setup supports coarse severity ranking more clearly than fine-grained structural discrimination. The same analysis also showed that variability-style ordering is less stable than mean-level attenuation, so the primary claim remains anchored to RSSI and CSI mean summaries rather than to secondary fluctuation metrics.

**Conclusions.** ESP32-S3 Wi-Fi sensing was evaluated for obstacle-severity ranking in one controlled indoor environment using 18,000 packets, 12 runs, and four static equal-distance scenarios. The most defensible result is the equal-distance 2.0 m order of empty space, closed door, one wall, and two walls, reproduced by both RSSI and run-level CSI summaries in all three runs. The grouped 50-packet-window probe over 360 windows from 12 equal-distance runs adds a secondary separability result: 93.6% accuracy and 0.936 macro-F1 on the four-class equal-distance task, with all 23 errors confined to the one-wall versus two-walls boundary. The evidence, therefore, supports a bounded conclusion: ESP32-S3 hardware can rank barrier severity in one local environment, while stronger obstacle-specific or generalized claims require equal-distance replication across more rooms, days, and geometries. Within that boundary, the present single-link sensing result can serve as a baseline for later cooperative Wi-Fi sensing studies that test whether multi-node observations improve obstacle-severity inference.

## References


1. S. Tan, Y. Ren, J. Yang, and Y. Chen, “Commodity wi-fi sensing in ten years: Status, challenges, and opportunities,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 18, pp. 17832–17843, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3164569.
2. M. Cominelli, F. Gringoli, and F. Restuccia, “Exposing the csi: A systematic investigation of csi-based wi-fi sensing capabilities and limitations,” in *2023 ieee international conference on pervasive computing and communications (percom)*, 2023, pp. 81–90. doi: 10.1109/PERCOM56429.2023.10099368.
3. C. Chen, G. Zhou, and Y. Lin, “Cross-domain wifi sensing with channel state information: A survey,” *ACM Computing Surveys*, vol. 55, no. 11, pp. 231:1–231:37, 2023, doi: 10.1145/3570325.
4. J. A. Armenta-Garcia, F. F. Gonzalez-Navarro, J. Caro-Gutierrez, and C. I. Garcia-Reyes, “Tools and methods for achieving wi-fi sensing in embedded devices,” *Sensors*, vol. 25, no. 19, p. 6220, 2025, doi: 10.3390/s25196220.
5. M. Diadiuk and V. Pavlenko, “Design and experimental evaluation of csi and rssi-based indoor wi-fi ranging on esp32-s3,” *Information and Communication Technologies, Electronic Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 86–100, 2026, doi: 10.23939/ictee2026.01.086.
6. D. Varga, “Mitigating data leakage in a wifi csi benchmark for human action recognition,” *Sensors*, vol. 24, no. 24, p. 8201, 2024, doi: 10.3390/s24248201.
7. A. Brunello *et al.*, “Time matters: Empirical insights into the limits and challenges of temporal generalization in csi-based wi-fi sensing,” *Internet of Things*, vol. 32, p. 101634, 2025, doi: 10.1016/j.iot.2025.101634.

# RESEARCH TRENDS AT THE INTERSECTION OF AI AND SUSTAINABLE EDUCATION

**Petrovych S.[1], Kosovets O.[2], Soia O.[2], Kovtoniuk M.[2]**
[1]University of Southern Denmark, Odense, Denmark
[2]Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine

**Abstract.** The rapid integration of artificial intelligence (AI) into education has significantly transformed teaching and learning processes, particularly in the context of sustainable development. This study presents a bibliometric analysis of research at the intersection of AI and sustainable education for the period 2021–April 2026. The dataset consists of 116 peer-reviewed articles retrieved from Scopus and analyzed using Biblioshiny and VOSviewer tools. The findings reveal a dynamic evolution of the field from early-stage digital transformation toward a mature, human-centered paradigm focused on generative AI, ethical considerations, and psychological impacts. The results highlight a fragmented yet rapidly expanding research landscape, characterized by strong regional diversification and thematic clustering. The study identifies key research trends, dominant publication channels, and emerging directions, emphasizing the need for interdisciplinary integration and ethical governance in AI-driven sustainable education.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Sustainable Education, Bibliometric Analysis, Generative AI, Higher Education, SDG 4.

**Introduction.** Artificial intelligence has become a central driver of transformation in modern education, reshaping pedagogical practices, institutional strategies, and learning environments [2, 6]. In parallel, the concept of sustainable education, aligned with the United Nations Sustainable Development Goal 4, emphasizes the need for inclusive, equitable, and high-quality learning systems that support long-term societal development [3, 5].

The convergence of these two domains has generated a rapidly growing body of research. However, despite the increasing number of studies, the field remains fragmented, with limited integrative analyses that capture its structural and thematic evolution. Existing research often focuses either on specific AI applications or on general sustainability frameworks, lacking a comprehensive synthesis of their intersection [7, 4, 1].

This study addresses this gap by conducting a bibliometric analysis of scientific publications on AI in sustainable education from 2021 to April 2026. The research aims to identify publication trends, key contributors, thematic structures, and emerging research frontiers.

**Formulation of the problem.** The accelerated integration of artificial intelligence (AI) into educational systems has intensified research activity in the context of sustainable development. However, the existing body of literature is characterized by conceptual fragmentation, methodological inconsistency, and a lack of systematized knowledge about the structural and thematic evolution of this research domain.

Most studies focus on isolated applications of AI or address sustainability in a generalized manner, without establishing clear interconnections between technological, pedagogical, and socio-ethical dimensions. Furthermore, there is a lack of comprehensive bibliometric studies that would provide a holistic view of publication dynamics, intellectual structure, and emerging research trends in the field.

This gap limits the ability to objectively assess the current state of research and hinders the development of theoretically grounded and methodologically consistent approaches to the integration of AI in sustainable education.

**The purpose of the work** is to conduct a comprehensive bibliometric analysis of scientific publications on the use of artificial intelligence in sustainable education for the period 2021–2026 in order to identify publication trends, key research areas, leading contributors, and emerging directions in the development of this interdisciplinary field.

**Research Method.** The study applies bibliometric analysis as a methodological approach to examine the intellectual structure and development of the research field. Data were collected from

the Scopus database using a targeted search query combining terms related to artificial intelligence and sustainable education.

Following the PRISMA framework, the initial dataset of 586 records was filtered by publication year (2021–2026), document type (articles), language (English), and subject areas (Social Sciences and Psychology). After screening, 116 articles were included in the final analysis. The restriction to Social Sciences and Psychology was intentional: this study focuses on the socio-pedagogical and psychological dimensions of AI in sustainable education (e.g., motivation, ethics, well-being, equity) rather than on technical developments in computer engineering.

Biblioshiny (R package) was used for descriptive bibliometric analysis, while VOSviewer enabled visualization of co-authorship, co-citation, and keyword networks. This combination ensured both quantitative rigor and conceptual mapping of the research field.

Results and Discussion.

**1. Publication Dynamics.** The analysis reveals a clear upward trend in research activity. The period 2021–2023 represents a foundational stage with limited output, while 2024 marks a turning point characterized by a dramatic increase in publications. This surge corresponds to the widespread adoption of generative AI technologies, particularly large language models.

By 2025–2026, the field appears to have entered a maturation phase, where research shifts from exploratory studies toward strategic and institutional integration of AI in sustainable education.

**2. Leading Journals and Authors.** The publication landscape is highly concentrated. More than half of the analyzed articles (60 out of 116, 51.7%) are published in the journal Sustainability, indicating a strong alignment of AI research with sustainability discourse.

In contrast, author productivity is highly fragmented, with most researchers contributing only a single publication (the top ten authors together account for only 9.5% of the output). This suggests that the field is still emerging and lacks a stable core of leading scholars.

**3. Geographical Trends.** The study identifies a multipolar research structure. China leads in publication output (22 articles), followed by Malaysia (7) and Saudi Arabia (7), reflecting strategic national investments in AI and digital education. European countries contribute primarily to ethical and human-centered aspects of AI, while emerging economies use AI as a tool for expanding access to sustainable education. This distribution highlights the global relevance and diversity of the research field.




Fig. 1. Conceptual Map Research Themes

**4. Conceptual Structure.** Keyword analysis reveals a core triad: *artificial intelligence* – *sustainability* – *education*. The dominance of terms related to higher education and students indicates that universities serve as primary environments for AI implementation (Fig. 1).

Three major thematic clusters are identified:

– technological (machine learning, AI systems),

– pedagogical (learning, curriculum, teaching),

– socio-ethical (literacy, emotional intelligence, sustainability).

This confirms a shift from technocentric approaches toward human-centered educational models.

**5. Emerging Trends.** Recent research increasingly focuses on generative AI, ethical challenges, and psychological impacts. The transition from digital tools to intelligent systems marks a fundamental paradigm shift.

At the same time, the field remains highly fragmented, with multiple independent research clusters and limited theoretical integration.

**Conclusion.** The bibliometric analysis demonstrates that research on artificial intelligence in sustainable education has rapidly evolved into a mature and interdisciplinary field. The findings indicate a transition from technological experimentation toward a human-centered paradigm – evidenced by the rise of generative AI (ChatGPT), ethical reflection, and psychological impact as dominant themes after 2024. Publication output peaked in 2025 (38 articles), with one journal (Sustainability) publishing 51.7% of all articles, and China leading geographically (22 articles).

Despite significant progress, the field faces several challenges, including fragmentation, lack of methodological standardization, and insufficient integration of ethical frameworks.

Future research should focus on longitudinal studies of AI's impact on learning, development of unified ethical standards, and the deeper integration of sustainability principles into AI-driven educational systems.

Overall, artificial intelligence has the potential to become a key enabler of sustainable education, provided that its implementation remains aligned with human values and long-term societal goals.

## References


1. Abbas, Z., Zhang, J., Junaid, M.: When learning meets the machine: How AI-assisted tools reshape deep and surface learning in higher education. Computers in Human Behavior Reports, vol. 22, p. 101057, (2026).
2. Abulibdeh, A., Zaidan, E., Abulibdeh, R.: Navigating the confluence of artificial intelligence and education for sustainable development in the era of industry 4.0: Challenges, opportunities, and ethical dimensions. Journal of Cleaner Production, Volume 437, p. 140527, (2024).
3. Abulibdeh, A.: A systematic and bibliometric review of artificial intelligence in sustainable education: Current trends and future research directions. Sustainable Futures, volume 10, p. 101033, (2025).
4. Al-Shamaileh, O., Hammady, R., Abdelrahman, M., Mubin, O.: Navigating ethical considerations and implications of AI chatbots in higher education: A systematic review. Computers and Education: Artificial Intelligence, vol. 9, p. 100131, (2026).
5. Arini, D., Nursa'ban, M.: Contribution of artificial intelligence (AI) in education to support the achievement of sustainable development goals (SDGs) 2030. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, volume 10, no. Special Issue, pp. 39-45, (2024).
6. Feng, S., Zhang, H., Gasevic, D.: Mapping the evolution of AI in education: Toward a co-adaptive and human-centered paradigm. Computers and Education: Artificial Intelligence, volume 9, p. 100498, (2025).
7. Leal Filho, W., Sigahi, T., Skouloudis, A., Rampasso, I., Anholon, R.: Beyond the hype: A sociotechnical perspective on AI's potentials and constraints in bridging the gap to basic-needs sustainability in higher education institutions. Technological Forecasting and Social Change, vol. 228, p. 124681, (2026).

# NOVEL FRAMEWORK FOR ACADEMIC EVENT MODULE DESIGN BASED ON EUROPEAN STANDARDS

**Rudakova T. V., Shapovalov Ye. B., Shapovalov V. B., Zharinov S. S., Krasovskyi O. I.**
State Scientific and Technical Library of Ukraine, Kyiv, Ukraine
National Center «Junior Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper addresses the design and development of a user-friendly academic events module as a functional component of Ukraine's National Electronic Scientific Information System ([[URIS]]). Existing domestic and international conference platforms were systematically evaluated against four design criteria — attractiveness, information structuring, readability, and mobile-friendliness — on a five-point scale by three expert evaluators using a heuristic usability evaluation methodology. Findings indicated that domestic Ukrainian platforms averaged approximately 2 points while international counterparts reached around 3 points, revealing substantial deficiencies in both segments and a clear absence of integrated national reporting functionality. Building on this analysis and guided by modern UI/UX principles including the Ukrainian Diia government design system, 17 user interfaces were prototyped in Figma for the URIS academic events module. The developed interfaces cover BankID and email authentication, event search with filtering and ranking, organiser profiles with trust ratings, conference pages with prestige indicators, interactive programs and proceedings, researcher personal cabinets, and three-level statistical dashboards for institutional, departmental, and individual reporting. The module represents the first open-access, nationally integrated academic event platform in Ukraine, utilizing a decentralized data exchange architecture connected to the central URIS Complex Data API for automated metadata collection.

**Keywords:** academic events, URIS, CRIS, open science, UI/UX design, conference platform, Diia, scientific events module, digitalization, user interface, innovation design

**Introduction.** Scientific conferences and academic events are indispensable mechanisms of the research ecosystem: they provide rapid dissemination of results, enable peer feedback, foster interdisciplinary collaboration, and connect science with industry and society. As the global research landscape moves toward Open Science, the digital infrastructure supporting academic events must evolve correspondingly, offering not only basic registration and submission functionality but also transparent quality indicators, seamless integration with researcher profiles, and standardised metadata for cross-system interoperability. In Ukraine, this need is formally recognised: Cabinet of Ministers Resolution No. 1067 (27 September 2022) explicitly mandates the development of an academic events registration module as one of the functional components of URIS. Yet analysis of existing platforms — both domestic and international — reveals that current solutions are functionally adequate but visually and structurally outdated

**Work goal.** To substantiate current trends in UI/UX design and to develop a comprehensive data architecture and interface prototype for the academic events registration module of URIS, grounded in expert evaluation of existing platforms and informed by Ukrainian national design standards that meet European research infrastructure requirements.

**Problem statement.** Eleven platforms were examined — six international (ConfIDent, Conference Index, OpenResearch, WikiCFP, EasyChair, Morressier) and five Ukrainian (UkrINTEI system, IMZO dataset, NAPS dataset, NAS of Ukraine dataset, MoH Testing Centre system). Considering the analysis, it seems relevant to provide an approach of modern UI/UX for the purpose.

**Main part.** The research applied a systematic, user-centred methodology. First, a literature review identified validated website design evaluation criteria [Alsulami et al., 2021], comprising three main groups — design, content, and functionality — with 17 subcriteria. Design-related subcriteria (attractiveness, information structuring, readability, mobile-friendliness) were adapted into a structured Google Forms expert questionnaire. The questionnaire was completed independently by three domain evaluators. The selection of three experts is methodologically justified by Nielsen's model of heuristic evaluation [Nielsen, 1994], which establishes that a panel of three to five evaluators is optimal for detecting approximately 70-75% of usability design flaws, balancing resource constraints with evaluation reliability. Results confirmed that on a five-point

scale, mobile-friendliness was the highest-scoring criterion at 2.3 points, while information structuring scored lowest at 1.6 points. Readability and attractiveness were similar at 1.8–1.9 points.

Architecturally, the module is integrated into the decentralized URIS framework, where institutional local servers function as edge nodes feeding data to a central cloud database. To facilitate automated data validation and exchange, the sub-system communicates via a single-entry API connector linked to the central URIS Complex Data API. This connector integrates international persistent identifiers (ORCID ID for scientist profiles, DOI for publication metadata, and ROR for institutional data) and national registries (EDRPOU, EDEBO, and BankID/RNOKPP for secure authentication). This data exchange pipeline ensures that when a researcher registers for an event, their metadata is verified automatically, reducing duplicate data entry and allowing seamless synchronization of event participation back to their national profile [Shapovalov, 2023].

Based on these findings and drawing on the life-cycle analysis of academic events, previously constructed business process models [Rudakova, 2024]. 17 user interfaces were designed in Figma, guided by the Ukrainian Diia design system. Diia was selected as the design reference because it represents the highest-rated Ukrainian digital government service, characterised by minimalist aesthetics, intuitive navigation, and high usability across device classes. The developed interfaces include: (1–3) home page with event announcements and organiser rating scale, background information pages, and information article template; (4–5) event search page with ranking and filtering, and organiser event list; (6–9) organiser profile page linked to URIS, conference page with prestige and publication indicators, interactive program with speaker and session details, and interactive proceedings with per-publication author metadata; (10–11) administrator/academic secretary dashboard for material approval and MES reporting, and researcher personal cabinet with favourites and participation history; (12–14) BankID authentication, email authentication, and registration page using RNOKPP and URIS ID; (15–17) three-level statistical dashboards at institutional, departmental, and individual scientist levels, aligned with MES national aggregation requirements. A unique feature distinguishing the URIS module from all analysed platforms is the organiser trust rating displayed on the home page and individual event pages, enabling researchers to assess conference quality and prestige before submission. Persistent event identifiers will support automatic metadata exchange and FAIR-compliant data discovery.

**Conclusions.** Seventeen user interfaces for the URIS academic events module have been developed, constituting the first open-access, nationally integrated conference platform in Ukraine. The design resolves identified deficiencies in existing domestic and international platforms by combining modern UI/UX principles with the Ukrainian Diia design standard, integrating event management with national scientific reporting, and introducing organiser trust ratings and event prestige indicators absent from any comparable system. The module is designed as part of the broader URIS ecosystem, ensuring compatibility with CRIS architecture, ORCID researcher identification, and FAIR data principles. Future development will focus on ontology-based metadata representation of event data, full system integration with the URIS backend, and implementation of automated national and institutional statistics dashboards.

## References


1. Rudakova, T.: Open access to information about academic events: experience of creating a platform in Ukraine. Open Science and Innovation, vol. 1, no. 1, pp. 4–17 (2024).
2. Shapovalov, Y. B., Shapovalov, V. B., Zharinova, A. G., et al.: An Academic Events Sub-System of the URIS and Its Ontology Representation. 3rd Edge Computing Workshop, pp. 130–140 (2023).
3. Alsulami, M. H., Khayyat, M. M., Aboulola, O. I., et al.: Development of an Approach to Evaluate Website Effectiveness. Sustainability, vol. 13, no. 23 (2021).
4. Hagemann-Wilholt, S., Hauschke, C., Plank, M.: ConfIDent — An Open Platform for FAIR Conference Metadata. Grey Journal, vol. 16, no. 2, pp. 95–100 (2020).
5. Iana, A., Jung, S., Naeser, P., et al.: Building a Conference Recommender System Based on SciGraph and WikiCFP. SEMANTICS 2019, pp. 117–123.
6. Nosenko, Y., Sukhikh, A.: Open Science in Terms of Building a Knowledge Society and Digital Transformations of the European Space. Physical and Mathematical Education, vol. 26, no. 4 (2020). 7. Nielsen, J.: Heuristic evaluation. In: Nielsen, J., Mack, R.L. (eds.) Usability Inspection Methods, pp. 25–62. John Wiley & Sons, New York (1994)

# USING WEB TECHNOLOGIES TO STUDY THE OPTICAL PROPERTIES OF MATERIAL

**Tovtyn M. M., Mitsa O. V., Petsko V. I.**
Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

**Abstract**. The study explores the application of modern web technologies for investigating the optical properties of materials in a digital environment. The increasing availability of browser-based tools enables the development of interactive platforms for modeling and analyzing optical phenomena without the need for specialized software. This paper examines the key approaches to implementing web-oriented systems for studying optical characteristics, including refractive index behavior, light propagation, and polarization effects. Special attention is given to the advantages of web-based solutions, such as accessibility, platform independence, and real-time visualization.

As a practical example, a custom-developed web application is presented, designed for analyzing polarization and dispersion-related optical properties. The system provides interactive tools for simulating optical processes and allows users to explore the influence of various parameters on material behavior. The results demonstrate that web technologies can serve as an effective instrument for both educational and research purposes in the field of optical modeling.

**Keywords**: Web Technologies, Optical Properties, Polarization, Refractive Index, Dispersion, Modeling, Web Application.

**Introduction**. The rapid development of information technologies has significantly influenced the methods used for studying physical processes, including optical phenomena. Traditional approaches to investigating the optical properties of materials often rely on specialized laboratory equipment and desktop-based software, which may limit accessibility and flexibility. At the same time, the growth of web technologies has opened new opportunities for creating interactive, platform-independent tools that can be accessed through standard web browsers [1].

Web-based applications enable real-time modeling and visualization of complex physical processes, providing users with intuitive interfaces and immediate feedback. This is particularly important in the field of optics, where the analysis of phenomena such as light propagation, polarization, and refractive index dispersion requires both accuracy and clarity of representation. Modern web technologies, including JavaScript frameworks and GPU-accelerated graphics, allow for the implementation of efficient simulation systems that were previously available only in specialized environments [2], [3].

In recent years, there has been an increasing interest in the development of web-oriented tools for scientific research and education. Such systems not only simplify access to computational resources but also facilitate the integration of modeling tools into the learning process. As a result, web technologies are becoming an important component of digital laboratories and virtual experimentation platforms [4].

Therefore, the application of web technologies for studying the optical properties of materials represents a relevant and promising research direction that combines modern IT solutions with the tasks of physical modeling.

**The purpose of this work** is to analyze the possibilities of using web technologies for studying the optical properties of materials and to develop a web-based tool for modeling and visualizing optical phenomena, including polarization and refractive index dispersion.

**Formulation of the problem**. The study of optical properties of materials requires the analysis of complex physical processes such as light propagation, interaction with media, polarization, and dispersion **[**2], [5]**.** Traditional software solutions for such tasks are often platform-dependent, require installation, and may not provide sufficient interactivity for educational or exploratory use.

At the same time, there is a need for accessible, flexible, and interactive tools that allow users to model optical phenomena in real time and analyze the influence of different parameters on material behavior. Therefore, the problem is to develop an efficient web-based system that ensures

accurate modeling of optical processes while maintaining usability, accessibility, and cross-platform compatibility.

**Solving the problem**. To solve the outlined problem, a web-oriented approach to modeling the optical properties of materials has been developed, combining modern client-side technologies with physically grounded computational models. The proposed solution is based on the idea of transferring core elements of optical simulation into a browser environment, ensuring accessibility, interactivity, and platform independence.

The system is implemented as a single-page web application, where all computational and visualization processes are performed on the client side. This approach eliminates the need for external computational resources and allows real-time interaction with the model. The application architecture is modular and consists of several functional components: a user interface layer, a computational core, and a visualization module.

The computational core is responsible for simulating the behavior of light in different media. It incorporates models describing the dependence of the refractive index on wavelength (dispersion), as well as polarization effects arising during the interaction of electromagnetic waves with material boundaries [5], [6], [7]. In particular, the system enables the analysis of light behavior under varying input parameters such as wavelength, angle of incidence, and material-specific optical constants. This allows users to observe how these parameters influence reflection, transmission, and polarization states.

To ensure physical relevance, the modeling approach is based on well-established optical principles. The interaction of light with interfaces is described using classical electromagnetic theory, while dispersion effects are introduced through parametric representations of refractive index variation. Although the implementation is optimized for performance in a web environment, it preserves sufficient accuracy for both educational demonstrations and preliminary research analysis.

A key feature of the proposed solution is the integration of interactive visualization tools. The system dynamically renders graphical representations of optical processes, allowing users to track changes in real time. Visualization includes plots of parameter dependencies, as well as schematic representations of light propagation and polarization states. This significantly enhances the interpretability of results and supports an intuitive understanding of complex optical phenomena.

As a practical realization of the proposed approach, a custom web application has been developed and deployed. The application provides a dedicated module for studying polarization effects, where users can manipulate input parameters and immediately observe the resulting changes. The interface is designed to be user-friendly while maintaining the flexibility required for more advanced exploration. The tool enables experimentation with different configurations, effectively functioning as a virtual laboratory for optical studies [8].

An important advantage of the developed system is its scalability. The modular architecture allows for the integration of additional functionalities, such as modeling multilayer optical structures, extending dispersion models, or incorporating more advanced physical effects. Furthermore, the web-based nature of the system simplifies its use in educational contexts, enabling easy distribution, remote access, and collaborative learning.

Performance considerations were also taken into account during development. By leveraging modern JavaScript engines and efficient rendering techniques, the application ensures smooth interaction and real-time responsiveness. This is critical for maintaining user engagement and supporting exploratory analysis.

Thus, the proposed web-based solution demonstrates that modern information technologies can effectively be applied to the modeling of optical properties of materials. It combines computational modeling, interactive visualization, and accessibility, providing a versatile tool for both educational and research applications.

**Conclusion**. The conducted study demonstrates that web technologies provide an effective foundation for developing interactive tools for studying the optical properties of materials. The

proposed approach makes it possible to transfer complex optical modeling processes into a browser-based environment, ensuring accessibility, platform independence, and ease of use.

The developed web application confirms the feasibility of implementing computational models of optical phenomena, including polarization and refractive index dispersion, using client-side technologies. The integration of real-time visualization and interactive parameter control significantly enhances the understanding of physical processes and supports both educational and exploratory research activities [1].

The results indicate that web-based systems can serve as a viable alternative to traditional specialized software, particularly in contexts where accessibility and usability are critical. At the same time, the modular architecture of the proposed solution allows for further expansion, including the integration of more advanced models and additional optical effects.

Future work may focus on improving the accuracy of computational models, extending the functionality of the system to include multilayer optical structures, and incorporating adaptive or intelligent components for automated analysis. Overall, the use of web technologies in optical modeling represents a promising direction for the development of modern digital research and educational tools.

## References


1. Foley, J., et al.: WebTOP: A 3D Interactive System for Teaching and Learning Optics. *Computers & Education*, Vol. 49, Issue 1, pp. 110–129, (2007).
2. Cohen, D., Stamnes, S., et al.: Comparison of Discrete Ordinate and Monte Carlo Simulations of Polarized Radiative Transfer in Layered Media. *Optics Express*, Vol. 21, No. 8, pp. 9592–9614, (2013).
3. Milton, H. E., Nagaraj, M., et al.: Field-Induced Refractive Index Variation in Liquid Crystal Lenses. *Applied Optics*, Vol. 53, No. 31, pp. 7278–7284, (2014).
4. Petsko, V., Mitsa, O.: Modeling the Effect of Inhomogeneities on Spectral Characteristics of Narrow-Band Optical Filters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, pp. 32–38, (2014).
5. Weidlich, A., Wilkie, A.: Anomalous Dispersion in Predictive Rendering. *Computer Graphics Forum*, Vol. 28, No. 4, pp. 1065–1072, (2009).
6. Hu, Y., Jiang, Y., et al.: Asymptotic Dispersion Engineering for Ultra-Broadband Meta-Optics. *Nature Communications*, Vol. 14, (2023).
7. Mussina, R., Selviah, D. R., et al.: Numerical Modeling of Dispersion Characteristics of Optical Fibers. *SPIE Photonics Conference*, (2024).
8. Optical Characteristics Web Application: Polarization Module. Available at: https://optical-characteristics-dispersion.vercel.app/polarization

# USE OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES TO IMPROVE MANAGEMENT IN UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES OF UKRAINE

**Yelistratova L.A.[1,2], Apostolov A.A.[1,2], Pidgrushnyi G.P.[2], Khodorovskyi A.Ya.[1], Zakharchuk Y.V.[1,3]**

[1]State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine"

[2]Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine, 44 Volodymyrska Str., Kyiv, 01034, Ukraine

[3]Budget Institution "National Center for GHG Emission Inventory", Vasily Lipkovsky Str., 35, Kyiv, 03035, Ukraine

**Abstract.** The study demonstrates the use of geoinformation technology based on satellite data from the Suomi NPP/VIIRS satellite on nighttime light intensity for 2020, as well as statistical data on population for 2021 and the value of sold industrial production for 2020 at the level of united territorial communities.

The geoinformation technology consists of data acquisition, processing, and analysis blocks, on the basis of which the results necessary for managerial decision-making within communities are obtained. The level of economic development of united territorial communities was assessed as high, medium, or low using a newly developed index, and a corresponding map was created. An analysis of the obtained map of economic development of united territorial communities was carried out, and four spatial areas were identified.

The integrated use of satellite and ground-based data makes it possible to significantly increase the informativeness of the proposed technology, which can improve managerial decision-making regarding community development.

**Keywords:** geoinformation technology, nighttime light intensity, united territorial communities, economic development, Ukraine.

**Introduction.** The development of theory and practice related to the socio-economic development of territories should be considered a necessary condition for the state regulation of economic activity in Ukraine. Such activity should be reflected in territorial planning, the main factor of which is the consideration of the properties and characteristics of regional economic systems and the assessment of the impact of local features on economic activity.

At the same time, territorial development management requires the strengthening of the instrumental framework that enables the collection, processing, analysis, and visualization of data for making well-grounded managerial decisions regarding socio-economic development.

**The purpose of this study** is to develop the scientific foundations of geoinformation monitoring technology in combination with statistical information for assessing the economic development of united territorial communities.

**Formulation of the problem**. Due to the rapid development of the Earth remote sensing industry and the emergence of new satellites, the amount of input data has significantly increased. The implementation of these data using geoinformation technologies for the study of socio-economic processes has become highly relevant, as such data can characterize the features of socio-economic development both at the national level and at the level of united territorial communities.

Global experience also demonstrates the possibility of addressing a wide range of information support issues through the use of Earth remote sensing technologies. Nighttime light data are widely used as indicators of economic activity, urbanization, and sustainable development at various spatial scales. The integration of nighttime light data with statistical and geospatial information significantly improves the assessment of regional economic development and expands the opportunities for supporting management decision-making. At the same time, modern geoinformation approaches provide the integration, processing, analysis, and visualization of heterogeneous spatial data, which is particularly important for monitoring and managing territorial communities [1–4]. Therefore, the development of geoinformation technologies based on the integrated use of satellite and statistical data remains an important scientific and practical task.

**Solving the problem.** To develop the geoinformation monitoring technology, the following input data were used: statistical data for 2020 on the value of sold industrial production. The data were presented according to the Classification of Objects of the Administrative-Territorial Structure of Ukraine (KOATUU). Data on the population of united territorial communities were obtained from the official website of the State Statistics Service of Ukraine for 2021. The study also used nighttime light data for 2020 obtained from the Suomi NPP/VIIRS satellite. The possibility of using nighttime light data for assessing socio-economic conditions has been demonstrated in previous studies [5–7].

For processing statistical data, a program was developed in the Delphi programming language, which made it possible to quickly obtain the value of sold industrial production for each united territorial community. To assess the level of economic development of united territorial communities in Ukraine, it was proposed to recalculate the input parameters per capita, i.e., to work with relative indicators and apply factor analysis.

Figure 1 presents the scheme of the geoinformation monitoring technology integrated with statistical information.

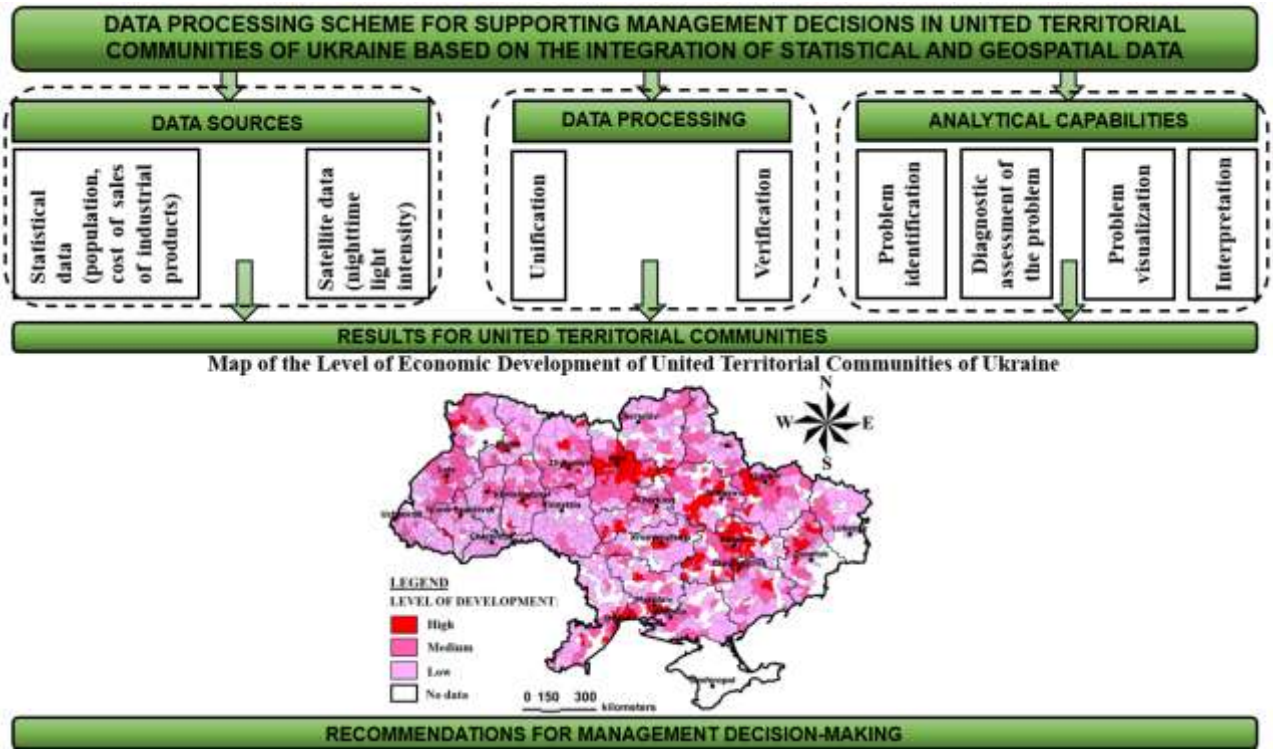



Fig. 1. Data processing scheme for supporting managerial decision-making in united territorial communities of Ukraine based on the integration of statistical and geospatial data

As a result of applying the step-by-step methodology, a map of the economic development level of the amalgamated territorial communities of Ukraine was obtained.

The analysis of the map showed that communities located around the administrative centers of the regions demonstrate a high level of economic development. Based on the spatial distribution of anomalies across the country, the following economic development regions (zones) can be distinguished:

1. **Northern (Kyiv) region** – a single anomaly center is located around Kyiv.
2. **Eastern region** – this area includes urban territorial communities (Kharkiv, Poltava, Dnipro, Zaporizhzhia, Kryvyi Rih, Donetsk), where industrial development is well pronounced. A significant number of anomalies are concentrated within this region.
3. **Western (Lviv) region** – characterized mainly by average levels of economic development.
4. **Southern region** – the highest level of economic development is observed around Odesa and Mykolaiv.

**Conclusion**.

The obtained results showed that the use of geoinformation technologies and satellite data makes it possible to rapidly and cost-effectively assess economic development at the level of amalgamated territorial communities. The use of such information can improve managerial decision-making regarding community development.

## References


1. Andries, A., Morse, S., Murphy, R. J., Sadhukhan, J., Martinez-Hernandez, E., Amezcua-Allieri, M. A., & Aburto, J. (2023). Potential of Using Night-Time Light to Proxy Social Indicators for Sustainable Development. Remote Sensing, 15(5), 1209. https://doi.org/10.3390/rs15051209
2. Xu, T., Zong, Y., Su, H., Tian, A., Gao, J., Wang, Y., & Su, R. (2023). Prediction of Multi-Scale Socioeconomic Parameters from Long-Term Nighttime Lights Satellite Data Using Decision Tree Regression: A Case Study of Chongqing, China. Land, 12(1), 249. https://doi.org/10.3390/land12010249
3. Wang, Z., Zheng, J., Han, C., Lu, B., Yu, D., Yang, J., & Han, L. (2025). A comprehensive assessment approach for multiscale regional economic development: Fusion modeling of nighttime lights and OpenStreetMap data. Geography and Sustainability, 6(2), 100230. https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.08.009
4. Koshel, A., Denysiuk, B., & Poltavets A. (2025). Algorithm for the Use of Geoinformation Technologies for the Purpose of Geoecological Monitoring of Territorial Communities. Land Management, Cadastre and Land Monitoring, 4, 108-116. https://doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.08
5. Pidgrushnyi, G. P., Yelistratova, L. O., Apostolov, O. A., Provotar, N. I. (2025). The Use of Satellite Information in the Study of the Spatial Organization of Society. Ukrainian Geographical Journal, 3, 51–60. https://doi.org/10.15407/UGZ2025.03.051
6. Yelistratova, L. O., Apostolov, O. A., Khodorovskyi, A. Ya., Khyzhniak, A. V., Tomchenko, O. V., Lialko, V. I. (2022). Use of satellite information for evaluation socio-economic consequences of the war in Ukraine. Ukrainian Geographical Journal. 2, 11-18. https://doi.org/10.15407/ugz2022.02.011
7. Yelistratova L., Apostolov A., Lyalko V., Tomchenko O., Khyzhniak A., Hodorovsky A. (2022). The results of socio-ecological monitoring during military operations in Ukraine using satellite information. Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., 66(2), 117–136. URL: http://www.rjgeo.ro/issues/revue_roumaine_66_2/yelistratova%20et%20al..pdf

# INFORMATION TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN MEASUREMENTS AND SCIENTIFIC RESEARCH

**Zashchepkina N.**, **Petrov V.**, **Hlabets S.**, **Vinnichenko O.**, **Tymchyk R.**
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

**Abstract.** This paper analyzes the development of information technologies and their role in modern scientific research and measurement processes. Particular attention is paid to information-measurement technologies (IMT), which combine hardware, software, and methodological tools to ensure accurate and reliable data collection and interpretation.

The study demonstrates the importance of processing large data sets using statistical methods, data mining techniques, and elements of artificial intelligence for modeling and forecasting complex systems. The role of scientometric databases and digital platforms in supporting research activities and evaluating scientific output is also considered. In addition, modern approaches to data aggregation, cloud computing, and distributed system architectures are highlighted as essential components for efficient research workflows.

Practical applications of IMT in environmental monitoring and industrial process control are discussed. It is concluded that the implementation of information technologies enhances the accuracy, efficiency, and reliability of research results while supporting informed decision-making and optimization of scientific and production processes.

**Keywords**: information technologies, IMT, data analysis, data aggregation, digitalization.

**Introduction.** Modern scientific research is increasingly based on the analysis of large data sets. In this regard, methods of mathematical statistics, probability theory, data mining, and artificial intelligence technologies are becoming widely used. These approaches enable both the processing of large volumes of data and the identification of hidden patterns, as well as the development of predictive models and the optimization of complex systems.

One of the key aspects of modern scientific activity is the use of scientometric databases and digital platforms. They provide access to global information resources, facilitate the integration of scientific research into the international arena, and make it possible to evaluate the effectiveness of scientific activity. The growth in the number of scientific publications and information resources also necessitates the improvement of methods for searching, systematizing, and analyzing information.

**The purpose of the work.** When analyzing the significant growth in the volume of scientometric databases as of 2025, it should be noted that a considerable amount of scientific documents available through the system are partially or fully generated by artificial intelligence, which leads to the dissemination of unreliable information. The implementation of IT in scientific activities is represented as a block diagram (Fig. 1), which comprises several blocks: Task Statement, Analysis of Possible Solutions, Databases, Results Evaluation, Task Solving, and Implementation Guidelines, with a feedback loop to Task Statement.

**Formulation of the problem.** Thus, the application of information technologies across various areas of scientific activity is of considerable relevance, demanding an appropriate level of knowledge and the ability to navigate the information landscape.

**Solving the problem.** Modern scientometric databases serve not only as tools for information retrieval but also form a digital ecosystem for evaluating scientific activity, which influences the choice of research topics and international scientific cooperation.

Particular attention should be paid to data aggregation processes, which are an important component of modern information systems. Aggregation makes it possible to combine information from different sources, increasing its value and enabling comprehensive analysis. Combined with cloud computing and distributed systems, this creates the conditions for efficient real-time data processing.

The application of IMT (information and measurement technologies) covers a wide range of fields, including environmental monitoring, industrial control, energy, and infrastructure. In the

field of environmental protection, IMT is used to monitor the quality of air, water, and soil, which makes it possible to respond promptly to changes in environmental conditions. In industry, they ensure the control of technological processes, improvement of product quality, and production efficiency.

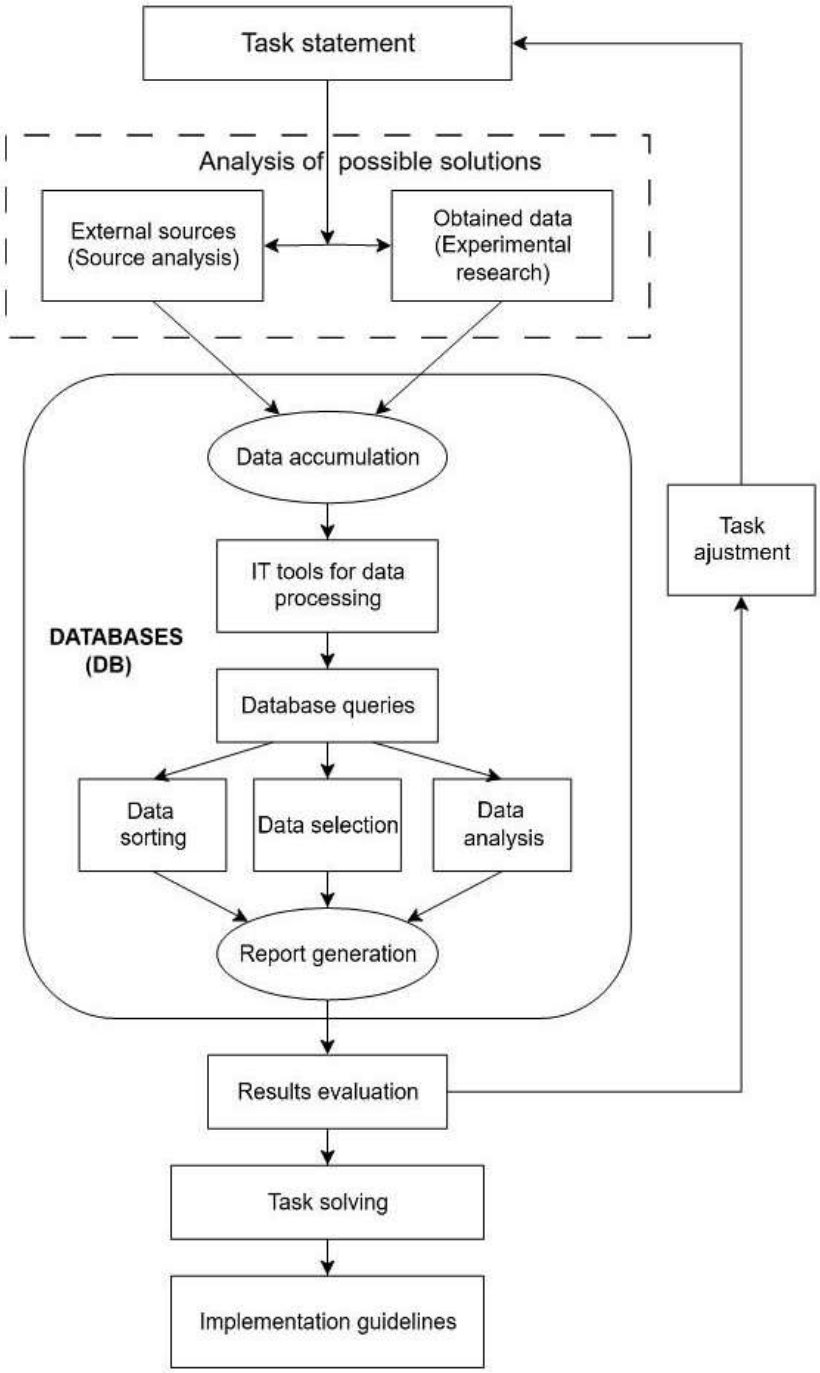



Fig. 1. Implementation of information technologies in data measurement and control

Modern information architectures play a significant role in the development of IMT, in particular, distributed systems and the use of REST APIs for organizing interaction between software components. This makes it possible to create flexible, scalable, and efficient data processing systems. An important element of such systems is also networks of sensors, which ensure the collection of primary information in real time.

Particular attention should be paid to the application of mathematical signal processing methods, in particular for the analysis of transient processes. The use of such tools as the Hilbert

transform makes it possible to improve the accuracy of pulse signal analysis. In addition, causal analysis methods - in particular the Ishikawa diagram - are widely used to analyze influencing factors. In technical diagnostics, IMT is used for the non-destructive testing of objects, especially crucial pipelines. This enables the evaluation of their technical condition, the identification of defects, and the assurance of safe operation. The use of modern uncertainty analysis methods improves measurement accuracy and the reliability of the results obtained.

**Conclusion**. Thus, the implementation of information technologies is one of the key factors in the development of modern science and engineering. They improve the efficiency, accuracy, and reliability of research, contribute to the optimization of production processes, and create the prerequisites for further scientific and technological progress. The further development of IT and IMT is a necessary condition for ensuring innovative development, environmental safety, and the sustainable functioning of modern society.

## References


1. Anilovska, H., Polyakova, Yu.: Information technologies as a tool for conducting scientific research. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences* 310(5(1)), 282–287 (2022). https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-310-5(1)-46
2. Kofanova, O.V., Tverda, O.Ya., Tkachuk, K.K., Kofanov, O.Ye. (eds.): *Methods of Processing Research Results: Educational Manual for Master's Students in Specialty G2 "Environmental Protection Technologies"*. KPI named after Igor Sikorsky, Kyiv (2025), 156 p.
3. Labunskyi, V., Zashchepkina, N., Labunska, A.: Improvement of the method for verification of water meters. *Measurement and Computing Equipment in Technological Processes* (2), 67–71 (2023). https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-22
4. Zashchepkina, N., Rudnytskyi, R.: Application of data aggregation process based on sensors in environmental monitoring and control of production processes. *Measurement and Computing Equipment in Technological Processes* (2), 258–265 (2024). https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-30
5. Hlabets, S., Eremenko, V.: Analysis of uncertainty components of defect size measurement in butt welded joints of polyethylene pipes by TOFD method. *Tekhnichna Diahnostyka ta Neruinivnyi Kontrol (Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing)* 3, 32–38 (2025). https://doi.org/10.37434/tdnk2025.03.04
6. Zdorenko, V.G., Zashchepkina, N.N., Barylko, S.V., Zaporozhets, A.O., Lisovets, S.M., Kiva, I.L.: Research on the interaction of ultrasonic waves with various textile materials in the process of non-contact control. In: *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 460, pp. 83–124. Springer (2023). https://doi.org/10.1007/978-3-031-23639-6_3
7. V. Babak, S. Babak, V. Eremenko, Y. Kuts, A. Zaporozhets. Information-Measuring. Systems. Theory and Application / *Studies in Systems, Decision and Control* (SSDC, volume 592). Springer, Cham. 2025.P.494. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89406-0
8. Antonenko S., Vertsanova O., Shadkhin V., Bondarenko M., Tuz V., Kurylenko Yu., Chychuzhko M. Prediction of Air Pollution by Particulate Dust Particles of PM2.5 and PM10 Using an Artificial Intelligence-Based Method. In: *Faure E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics*. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_21

# ЕМПІРИЧНА ВЕРИФІКАЦІЯ ПРИНЦИПІВ FAIR В ОСВІТНІХ НАУКАХ ЗАСОБАМИ GOOGLE ANALYTICS 4: ДОСВІД НАУКОВОЇ УСТАНОВИ

**Іванова С.М., Кільченко А.В.**
Інститут цифровізації освіти
Національної академії педагогічних наук України

**Анотація.** У роботі обґрунтовано використання інструментів вебаналітики системи Google Analytics 4 як технологічного засобу моніторингу вебресурсів наукових установ у межах парадигми відкритої науки (Open Science). Висвітлено проблему переходу від теоретичного декларування принципів FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability), що забезпечують відшукуваність, доступність, сумісність та придатність для повторного використання у галузі освітніх наук до їхньої практичної та емпіричної верифікації. Запропоновано методику конфігурування Google Analytics 4, адаптовану під потреби наукових установ, що включає налаштування спеціальних параметрів для відстеження цифрових ідентифікаторів об'єктів (DOI), авторів (ORCID) та специфічних подій. Представлено матрицю відповідності між категоріями FAIR та метриками Google Analytics 4. Описано практичний досвід Інституту цифровізації освіти Національної академії педагогічних наук України щодо використання вебаналітики для стратегічного управління науковими активами.

**Ключові слова:** принципи FAIR, відкрита наука, Google Analytics 4, вебаналітика, освітні науки, емпірична верифікація даних, наукова установа.

# EMPIRICAL VERIFICATION OF THE FAIR PRINCIPLES IN THE EDUCATIONAL SCIENCES USING GOOGLE ANALYTICS 4: THE EXPERIENCE OF A RESEARCH INSTITUTION

**Ivanova S., Kilchenko A.**
Institute for Digitalisation of Education of the
National Academy of Educational Sciences of Ukraine

**Abstract.** This paper justifies the use of Google Analytics 4 web analytics tools as a technological means of monitoring the web resources of scientific institutions within the framework of the Open Science paradigm. It highlights the challenge of transitioning from the theoretical declaration of the FAIR principles (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability) – which ensure discoverability, accessibility, interoperability, and reusability in the field of educational sciences – to their practical and empirical verification. A methodology for configuring Google Analytics 4, adapted to the needs of scientific institutions, is proposed, which includes setting special parameters for tracking digital object identifiers (DOI), authors (ORCID), and specific events. A correspondence matrix between the FAIR categories and Google Analytics 4 metrics is presented. The practical experience of the Institute for Digitalisation of Education of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine regarding the use of web analytics for the strategic management of scientific assets is described.

**Keywords:** FAIR principles, Open Science, Google Analytics 4, web analytics, educational sciences, empirical data verification, research institution.

**Вступ.** Останнє десятиліття характеризується стрімким зростанням обсягів цифрових наукових даних, зокрема в галузі освітніх наук. В умовах переходу до моделі відкритої науки (Open Science) особливого значення набуває забезпечення довгострокового збереження, доступності та інтероперабельності дослідницьких результатів. Одним із ключових інструментів вирішення цих завдань стали принципи FAIR (Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability), запропоновані М. Вілкінсоном (M. Wilkinson) [1]. Ці принципи передбачають, щоб наукові дані були: *відшукуваними* – із унікальними ідентифікаторами (DOI) та розширеними метаданими; *доступними* – через стандартизовані протоколи завантаження; інтероперабельними (сумісними) – у форматах, придатних для автоматизованого обміну; придатними для повторного використання (багаторазовими) – із

чіткими ліцензіями та детальною документацією. Попри визнання принципів FAIR на рівні міжнародних організацій (Європейська комісія, UNESCO), їх емпірична верифікація в конкретних предметних областях, зокрема в освітніх науках, залишається фрагментарною.

Більшість існуючих досліджень зосереджена на технічних аспектах реалізації FAIR (метадані, персистентні ідентифікатори, ліцензії), однак поза увагою залишаються питання кількісного вимірювання реального рівня дотримання цих принципів на основі поведінкових даних користувачів. Для галузі освітніх наук, де результатами діяльності є складні датасети та цифрові навчальні засоби, дотримання цих стандартів є критичною умовою інтеграції у міжнародний дослідницький простір [2]. Проте на практиці наукові установи стикаються з проблемою відсутності надійних інструментів емпіричного моніторингу. Існує нагальна потреба в розробці методики, яка б дозволила трансформувати технічні події вебаналітики у доказову базу життєвого циклу FAIR-даних. Інструменти вебаналітики, зокрема Google Analytics 4 (GA4), надають можливість емпірично оцінити ключові FAIR-характеристики цифрових об'єктів.

**Постановка задачі.** Актуальною науково-прикладною задачею є апробація методики кількісної оцінки дотримання принципів FAIR в освітніх науках із використанням даних вебаналітики, а також визначення зв'язку між рівнем FAIR-зрілості цифрових об'єктів та показниками їх фактичного використання. Для досягнення поставленої мети в межах цього дослідження необхідно було вирішити такі ***завдання***: обґрунтувати вибір індикаторів для кожного з чотирьох принципів FAIR, які можуть бути операціоналізовані засобами GA4 у контексті наукової установи; розробити схему збору та обробки даних вебаналітики, що забезпечує коректне відстеження взаємодій користувачів із цифровими науковими об'єктами (публікаціями, наборами даних, освітніми матеріалами); на основі емпіричних даних наукової установи кількісно оцінити рівень дотримання принципів FAIR за кожною групою індикаторів; виявити взаємозв'язки між окремими FAIR-індикаторами та показниками використання цифрових об'єктів (завантаження, зовнішні переходи, час залучення) та ін.

***Об'єктом дослідження*** виступають цифрові наукові об'єкти (публікації, набори даних, освітні матеріали), розміщені на вебресурсі наукової установи. ***Предметом дослідження*** є методика кількісної оцінки дотримання принципів FAIR із використанням GA4. Вирішення цих завдань дозволить не лише заповнити наявну прогалину в методології емпіричної верифікації FAIR в освітніх науках, а й надати практичний інструментарій для наукових установ, орієнтованих на впровадження принципів відкритої науки.

**Мета роботи** – обґрунтувати методику використання Google Analytics 4 як інструменту емпіричної верифікації реалізації принципів FAIR на вебресурсах наукових установ.

**Основна частина.** GA4 є інструментом вебаналітики, що ґрунтується на подієвій моделі (event based model). На відміну від попередніх версій, GA4 дозволяє відстежувати не лише перегляди сторінок, а й специфічні взаємодії з цифровими об'єктами: завантаження файлів, переходи до зовнішніх репозиторіїв, використання внутрішнього пошуку, кліки на DOI та ін. [3]. Потенціал GA4 для верифікації FAIR полягає в ***можливості:***

- оцінити Findability через джерела трафіку (пошук, прямі заходи, реферальні сайти);
- виміряти Accessibility через показники відмов (bounce rate) та глибину перегляду для сторінок із метаданими;
- проаналізувати Interoperability через відстеження переходів на сторонні сервіси (репозиторії, Crossref, Open AIRE);
- зафіксувати Reusability через події завантаження даних, цитування у відкритих джерелах та повторні візити.

Використання GA4 дозволяє перетворити якісні характеристики FAIR у кількісні показники. Нами розроблена модель інтеграції, представлена у табл. 1.

Як видно з табл. 1, використання GA4 дозволяє перевести якісні характеристики принципів FAIR у площину кількісних показників. Наприклад, реалізація принципу Reusable (багаторазовість) в галузі освітніх наук часто залишається декларативною, проте за

допомогою налаштування подій *file_download* у GA4, наукова установа отримує точні дані про кількість завантажень конкретних наборів даних або методичних розробок. Це дозволяє не лише звітувати про наявність матеріалів у відкритому доступі, а й аналізувати їхню реальну цінність для освітянської спільноти та дослідників.

Таблиця 1

**Співставлення принципів FAIR із метриками GA4**

| Принцип FAIR | Метрики та інструменти GA4 | Значення для наукової установи |
|---|---|---|
| ***F (Findable)*** | Джерела трафіку, переходи за DOI, Referral (OUCI, Scholar) | Оцінка відшукуваності даних за ідентифікаторами |
| ***A (Accessible)*** | Шлях користувача, показник відмов, технічні звіти (швидкість) | Виявлення бар'єрів у доступі до контенту |
| ***I (Interoperable)*** | Технічні дані (ОС, браузери), аналіз API-запитів | Перевірка технічної сумісності ресурсів |
| ***R (Reusable)*** | Події file_download (.csv, .xlsx), copy_citation | Підтвердження затребуваності даних для аналізу |

*Методика конфігурування системи.* Для реалізації моніторингу вебсайту наукової установи в Інституті цифровізації освіти НАПН України (ІЦО НАПН України) було застосовано специфічне налаштування GA4:

1. *Спеціальні параметри (Custom Dimensions):* Впроваджено трекінг resource_doi та author_orcid для унікальної ідентифікації об'єктів та авторів.
2. *Подієве відстеження (Event Tracking):* Налаштовано події file_download (з фокусом на формати даних) та copy_citation через Google Tag Manager.
3. *Приватність:* Забезпечено анонімізацію IP-адрес та відповідність вимогам GDPR.

*Результати та практичний досвід***.** Впровадження методики в ІЦО НАПН України дало наступні результати:

- *відшукуваність:* 32% трафіку на наукові звіти забезпечено через переходи з OUCI та Google Scholar. Оптимізація представлення DOI призвела до зростання органічного трафіку на 20%.
- *Доступність:* Скорочення шляху до файлу (з 4-х до 2-х кліків) знизило показник відмов на 12%.
- *Повторне використання: 18%* завантажень припало на формати .csv та .xlsx, що підтверджує інтерес до вторинної обробки даних. Кожен 10-й відвідувач використовує інструмент copy_citation.

**Висновки.** GA4 є ефективним інструментом верифікації принципів FAIR, що дозволяє перейти від декларативної відкритості до вимірюваної якості. Досвід ІЦО НАПН України доводить, що за допомогою вебаналітики можна ефективно діагностувати технічні бар'єри та підвищувати видимість української науки. Перспективи подальших досліджень вбачаються в розширенні інструментарію за рахунок інтеграції з відкритими платформами аналітики та застосуванні методів машинного навчання для прогнозування впливовості наукових результатів на основі FAIR-профілів.

## Список використаних джерел


1. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M. and Baak, A. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. https://doi.org/1010.1038/sdata.2016.18
2. Новицька, Т. Л. (2026). Платформи та сервіси для зберігання та обробки FAIR-даних: стратегії для освітньої галузі. *Сучасні трансформації педагогічної освіти: проблеми теорії і практики*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 29-30 січ. 2026 р. / за заг. ред. М. І. Воровки. Запоріжжя: ФОП Однорог Т. В. 454-457. https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/748584
3. Іванова, С. М., Кільченко, А. В. та Новицька, Т. Л. (2024). Система Google Analytics 4 – сучасний засіб відкритого доступу для моніторингу вебресурсу електронної наукової бібліотеки. *Освіта. Інноватика. Практика*, 12, 9, 18-26. https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol12i10-003.

# ОЦІНЮВАННЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ

**Кобзар Т.А., Крячок Т.В.**
Інститут інформаційних технологій та систем НАН України, Київ, Україна

**Анотація**. З метою оптимізації діагностичного процесу використано метод узагальнених оцінок, який показав свою доцільність при вирішенні завдання оперативного оцінювання психоемоційного та функціонального стану людини за умови дефіциту діагностичних засобів. У осіб, що перебувають під впливом довготривалих стресових подій, досліджувались прості, доступні в умовах різної складності базові параметри життєдіяльності та психоемоційної сфери. Були використані анкетні методи на самооцінку здоров'я, ряд опитувальників на рівень стресостійкості, деякі прості показники гемодинаміки, визначались ступінь напруження регуляторних систем організму та рівень стресу за показниками варіабельності серцевого ритму, тощо. Використовувались кореляційний аналіз та методи дескриптивної статистики, а для оцінювання загального функціонального стану - метод узагальнених оцінок [1]. Було виявлено зниження рівня стресостійкості, адаптаційного потенціалу та загального рівня здоров'я.

**Ключові слова:** Стресостійкість, функціональний стан, варіабельність серцевого ритму (ВСР), адаптаційний потенціал, узагальнена оцінка здоров'я.

# ASSESSMENT OF STRESS RESISTANCE USING DIGITAL MEDICINE TOOLS

**Kobzar T.A., Kryachok T.V.**
Institute of Information Technologies and Systems NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. In order to optimize the diagnostic process, the method of generalized assessments was used, which showed its feasibility in solving the problem of operational assessment of the psycho-emotional and functional state of a person in the absence of diagnostic tools. In individuals under the influence of long-term stressful events, simple, accessible basic parameters of vital activity and the psycho-emotional sphere in conditions of varying complexity were studied. Questionnaire methods for self-assessment of health, a number of questionnaires for the level of stress resistance, some simple indicators of hemodynamics were used, the degree of tension of the regulatory systems of the body and the level of stress were determined by heart rate variability indicators, etc. Correlation analysis and descriptive statistics methods were used, and for assessing the general functional state, the method of generalized assessments [1]. A decrease in the level of stress resistance, adaptive potential and general health level was revealed.

**Keywords:** Stress resistance, functional state, Heart Rate Variability (HRV), adaptive potential, generalized health assessment.

**Вступ**. Обставини війни потребують оперативних рішень в усіх актуальних сферах сьогодення. Особливо це стосується життя та здоров'я військовослужбовців, які зазнали впливу психотравмуючих чинників в бойових діях, та цивільного населення, яке постраждало від воєнної агресії. Актуальними є методики з використанням засобів цифрової медицини, що забезпечують оперативність прийняття рішень при пограничних станах здоров'я, за умов невизначеності або нечіткості проявів симптоматики, яка виникла в результаті дії травмуючих чинників. Стрес є саме таким чинником, який у всіх без виключення випадках налаштовує ансамбль регуляторних систем до реалізації адекватної програми життєдіяльності та, при постійній його дії, змінює цю програму, спонукаючи виснаження резервних можливостей організму, наслідком чого є посттравматичні стресові розлади (ПТСР), психосоматичні захворювання. В основі цих станів лежить порушення вегетативного забезпечення, а варіабельність серцевого ритму (ВСР) є універсальною реакцією, що відображує всі ланки регуляторної системи. Тому, визначення вегетативного балансу симпатичної і парасимпатичної систем у взаємозв'язку зі змінами в центральній нервовій системі, що відбуваються при дії хронічного стресу, розглядаються як предиктори психосоматичних серцево-судинних захворювань. За таких умов, актуальним є оцінювання

стресостійкості – феномену, який є глибоко індивідуальною інтегральною властивістю особистості з комплексом взаємопов'язаних когнітивних, інтелектуальних, емоційних, характерологічних особливостей та свідчить про спроможність людини до відновлення після впливу стресових подій. Однією із специфічних ознак відсутності стійкості до стресів є зниження адаптаційного потенціалу.

**Мета:** розробити алгоритм оцінювання стресостійкості з використанням засобів цифрової медицини.

**Задачі:** дослідити психоемоційний стан здоров'я, феномен стресостійкості, фізичний та загальний функціональний стан у цивільних осіб, що випробовують на собі тривалу дію психотравмуючих факторів; провести у них кількісне оцінювання функціонального стану на основі психоемоційного та фізичного стану здоров'я за методом узагальнених оцінок.

**Об'єкт і методи дослідження.** В дослідженні взяли участь 63 добровольці із числа працівників наукової установи, що належали до різних вікових груп, які окрім напруженої інтелектуальної праці випробовували на собі весь комплекс психотравмуючих факторів сьогодення. Окрім базових параметрів фізичного стану (артеріальний тиск (АТ), частота серцевих скорочень (ЧСС), тощо), визначали психоемоційний стан за шкалами: Г. Айзенка; стресостійкість та соціальну адаптацію за шкалою Холмса і Раге; наявність дистресорного «Д» типу особистості; схильність до ПТСР, госпітальної шкали тривоги та депресії (HADS). Розраховували рівень фізичного стану за методикою О.А. Пирогової; Вега-індекс Кердо; Темп старіння; варіабельність серцевого ритму; рівень функційного стану серцево-судинної системи за методом Фазаграфії; Адаптаційний потенціал Баєвського; проводили Експертне оцінювання лікаря.

В даному дослідженні для оцінки стану здоров'я людини були використані такі засоби цифрової медицини: комп'ютерний програмний комплекс «Фазаграф» [2] для аналізу вегетативного забезпечення організму; комп'ютерний комплекс оцінки характерологічних особливостей людини «ТОХО-20» [3]; сучасні засоби моніторингу фізичного стану здоров'я електрокардіограф «Юкард-200», пульсоксиметр, глюкометр. Для оцінювання функціонального стану людини було застосовано розроблений авторами комплексний метод узагальнених оцінок (УОЗ) [1].

Використовувались кореляційний аналіз та методи дескриптивної статистики, а для оцінювання загального функціонального стану – метод узагальнених оцінок.

Було виявлено зниження рівня стресостійкості, адаптаційного потенціалу та загального рівня здоров'я. Підтверджено гіпотезу про стресогінну дію поточної соціальної ситуації на функціональний, фізичний та психоемоційний стан, доказом чого є зниження рівня стресостійкості, адаптаційного потенціалу та загального рівня здоров'я, що визначається за показниками, які увійшли до узагальненої оцінки здоров'я.

**Висновок.** Проведене дослідження має багатоаспектне значення, оскільки дає можливість простими скринінговими засобами, якими є опитувальники, нескладні неінвазивні методи, а також узагальнені оцінки як засоби цифрової медицини, проводити оперативне оцінювання та мониторинг психоемоційного та функціонального стану для завчасного реагування у небезпечних для здоров'я та життя випадках.

## Список використаних джерел


1. Kobzar T.A., Kriachok T.V., Semikhova O.S., Chaliy P.V. Algorithm for Determining the Features of a Person's Psycho-Emotional and Functional State under Stressful Conditions. Information Technologies and Systems, Kyiv, 2025, Vol 1 (1), 77-88. https://doing.org/10.15.407/interests.2025.01.077
2. Файнзільберг Л.С. Інтелектуальні інформаційні технології оброблення сигналів з локально зосередженими ознаками (до 100-річчя з дня народження академіка В.М.Глушкова) // Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики». 2023. № 3. С. 61-73.
3. А. с. про реєстрацію авторського права на твір № 133518, Україна. Комп'ютерна програма «Методика оцінювання психічного стану та основних характерологічних рис» («ТОХО 2.0») / В. О. Козловська, В. М. Бєлов. Дата реєстрації 18.02.2025р.

# ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНІЧНОЇ ПАНЕЛІ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Мейш Ю.А.[1], Лелюх Ю.І.[2], Майбородіна Н. В.[3]**
[1]Національний університет біоресурсів та природокористування України, Київ, Україна
[2]Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна
[3]ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, Україна

**Анотація**. У роботі представлено результати чисельного моделювання динамічної поведінки конічної панелі еліптичного перерізу при імпульсному навантаженні з використанням скінченно-елементного програмного комплексу COMSOL Multiphysics. Метою дослідження є аналіз особливостей застосування сучасних програмних засобів для визначення напружено-деформованого стану конічних панелей еліптичного перерізу. За допомогою чисельного моделювання визначено розподіл переміщень і напружень у панелі, а також проведено порівняльний аналіз впливу двох типів закріплення бокових торців на характер динамічних процесів. Отримані результати підтверджують ефективність скінченно-елементного методу, реалізованого в програмному комплексі COMSOL Multiphysics, при розв'язанні динамічних задач конструкцій складної геометричної форми.

**Ключові слова:** конічна панель, еліптичний переріз, динамічна поведінка, імпульсне навантаження, COMSOL Multiphysics, метод скінченних елементів, умови закріплення.

# NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A CONICAL PANEL WITH ELLIPTICAL CROSS-SECTION USING INFORMATION TECHNOLOGIES

**Meish Yu[1]., Leluykh Yu[2]., Maiborodina N.[3]**
[1]The National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]S.P. Tymoshenko Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]Separated Subdivision of NULES of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute", Nizhyn, Ukraine

**Abstract**. This paper presents the results of numerical simulation of the dynamic behavior of a conical panel with an elliptical cross-section under impulsive loading using the finite element software package COMSOL Multiphysics. The aim of the study is to analyze the specific features of applying modern computational software to determine the stress-strain state of conical panels with elliptical cross-sections. Through numerical modeling, the distribution of displacements and stresses within the panel was determined, and a comparative analysis of the influence of two types of lateral edge fixation on the nature of dynamic processes was carried out. The obtained results confirm the efficiency of the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software package for solving dynamic problems of structures with complex geometry.

**Keywords:** conical panel, elliptical cross-section, dynamic behavior, impulsive loading, COMSOL Multiphysics, finite element method, stress-strain state, boundary conditions.

**Вступ**. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану просторових елементів конструкцій із використанням сучасних інформаційних технологій є актуальним напрямом досліджень механіки деформівного твердого тіла завдяки широкому застосуванню таких елементів у машинобудуванні, будівництві, авіаційній, енергетичній та транспортній галузях. Особливий інтерес становлять конструкції із складною геометрією, зокрема конічні панелі еліптичного перерізу, що характеризуються складним просторовим напружено-деформованим станом. Імпульсне навантаження спричиняє хвильові процеси, що призводить до локальних концентрацій напружень і суттєво впливає на їх динамічну поведінку. За таких умов використання спрощених підходів є недостатнім, що зумовлює необхідність застосування просторової постановки задачі теорії пружності та сучасних високоефективних обчислювальних комплексів для високоточного аналізу динамічної поведінки елементів конструкцій складної геометричної форми.

**Мета роботи.** Метою наукової роботи є дослідження особливостей використання сучасного скінченно-елементного комплексу COMSOL Multiphysics для математичного моделювання динамічної поведінки конічної панелі еліптичного перерізу та визначення її основних напружено-деформованих характеристик.

**Постановка задачі.** Напружено-деформований стан конічної панелі еліптичного перерізу визначається сукупністю геометричних параметрів конструкції, фізико-механічних властивостей матеріалу, характером імпульсного навантаження та типом граничних умов. Особливої складності задача набуває при дослідженні динамічної поведінки панелі при нестаціонарному навантаженні, коли хвильові процеси у матеріалі призводять до локальних концентрацій напружень і суттєво зростає вплив умов закріплення на загальний характер напружено-деформованого стану. У випадку конструкцій складної геометрії використання спрощених моделей може призвести до неточності розрахунків, що зумовлює необхідність застосування просторової постановки задачі теорії пружності.

Отже, виникає потреба у застосуванні адекватної математичної моделі, представленої у модулі Structural Mechanics скінченно-елементного комплексу COMSOL Multiphysics, що дозволило з високою точністю дослідити динамічну поведінку просторових елементів конструкцій при дії імпульсного навантаження та детально проаналізувати вплив умов закріплення на основні характеристики їх напружено-деформованого стану.

**Вирішення проблеми.** В роботі розглянуто ізотропну просторову конічну панель еліптичного перерізу під дією розподіленого імпульсного навантаження $P(t) = A\sin\dfrac{\pi t}{T},\ t \le T,\ A = 10^6\ Па,\quad T = 5\cdot 10^{-5}\ c$. Панель моделювалася як тривимірне деформівне тіло в межах просторової постановки задачі теорії пружності, що дозволило врахувати складну геометрію панелі, зміну напружень за товщиною та особливості її динамічної поведінки. Для опису руху використано основні співвідношення динамічної теорії пружності [1], а чисельну реалізацію виконано методом скінченних елементів у інтегрованій платформі моделювання фізико-хімічних процесів COMSOL Multiphysics 6.2 [2]. Дискретизація області здійснювалася вибором об'ємних ізопараметричних 20-ти вузлових скінченних елементів серендипового типу [2], що забезпечило коректне відображення просторового напружено-деформованого стану та геометричних особливостей еліптичного перерізу.

На рисунках 1–6 наведено результати порівняльного чисельного моделювання напружено-деформованого стану конічної панелі еліптичного перерізу в момент часу $t = 6T\ c$ : для двох типів граничних умов: жорсткого закріплення бокових торців панелі (перший стовпець, рис. 1, 3, 5) та їх шарнірного закріплення (другий стовпець, рис. 2, 4, 6). Верхній ряд (рис. 1-2) ілюструє просторові розподіли товщинного переміщення $u_\perp$, середній ряд (рис. 3-4) – окружних напружень $\sigma_{\varphi\varphi}$, а нижній ряд (рис. 5-6) – напружень уздовж твірної конуса $\sigma_{zz}$. Порівняння результатів показує, що тип закріплення суттєво впливає на розподіл переміщень і локалізацію напружень у панелі. Для жорсткого закріплення торців (рис. 1) спостерігається обмеження переміщень у зоні закріплення, що зумовлює складний розподіл деформацій. У випадку шарнірного закріплення (рис. 2) переміщення мають більш плавний характер розподілу та більшу амплітуду. Аналіз окружних напружень $\sigma_{\varphi\varphi}$ (рис. 3–4) показує, що жорстке закріплення спричиняє вищі локальні концентрації напружень, особливо поблизу торців і в зонах підвищеної кривизни, тоді як для шарнірного закріплення їх розподіл є більш рівномірним. Розподіли напружень уздовж твірної $\sigma_{zz}$ (рис. 5–6) підтверджують аналогічну закономірність: жорстке закріплення формує більш виражені зони концентрації напружень, тоді як шарнірне забезпечує м'якший перерозподіл напружено-деформованого стану. Максимальні значення напружень при жорсткому закріпленні є вищими, що є важливим при оцінці міцності та довговічності конструкції.

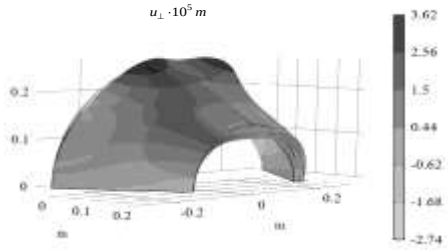



Рис. 1

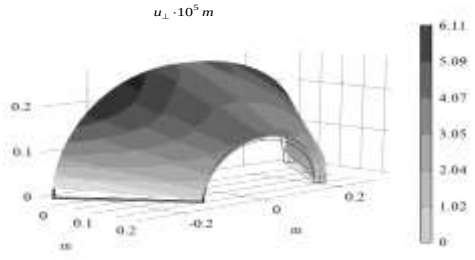



Рис. 2

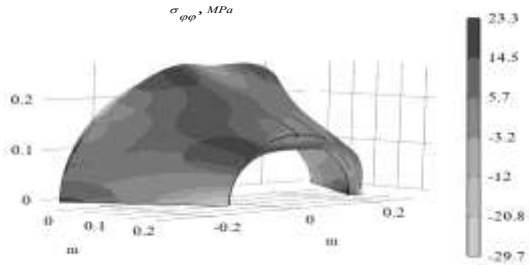



Рис. 3

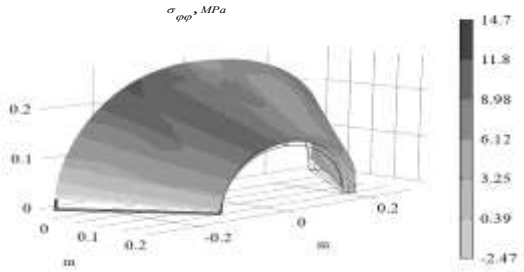



Рис. 4.

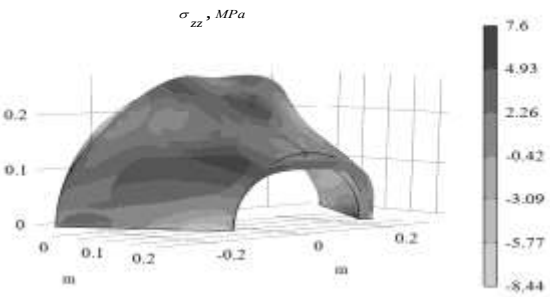



Рис. 5.

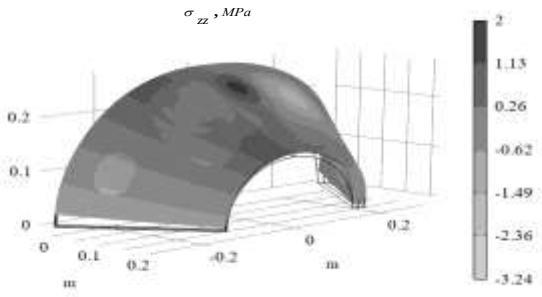



Рис. 6.

**Рис. 1–6.** Розподіли товщинного переміщення $u_\perp$ окружних напружень $\sigma_{\varphi\varphi}$ та напружень уздовж твірної $\sigma_{zz}$ конічної панелі еліптичного перерізу при $t = 6T\,c$: перший стовпець – жорстке закріплення торців, другий – шарнірне закріплення.

**Висновок.** Результати моделювання засвідчують гнучкість застосування потужного скінченно-елементного комплексу COMSOL Multiphysics для моделювання різноманітних фізико-хімічних процесів, а розроблений в інтегрованому середовищі розробки застосунків COMSOL Multiphysics автономний програмний додаток може бути використаний для підвищення точності розрахунків та оптимізації конструктивних рішень у відповідних сферах промисловості.

**Список використаних джерел**

1. Meish V.F., Meish Yu.A., Belova M.A. (2020). Nonstationary dynamics of isotropic conical shells of elliptical cross-section under distributed loads. International Applied Mechanics, 56(4), pp. 418–425. doi: 10.1007/s10778-020-01026-6
2. Structural Mechanics Module User's Guide © 1998–2025 COMSOL. https://doc.comsol.com/6.4/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html

# Е-ПОРТАЛ «U-MARC4OS»: ІНТЕГРАЦІЯ ДИНАМІЧНОГО САМООЦІНЮВАННЯ ТА ШІ-АДАПТОВАНОГО МІКРОНАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗВИТКУ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ В УМОВАХ ВІДКРИТОЇ НАУКИ

**Петрое О.[1], Драч І.[2]**
[1] ДЗВО «Університет менеджменту освіти» Національної академії педагогічних наук України, м. Київ, Україна
[2]Інститут вищої освіти Національної академії педагогічних наук України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Метою дослідження є обґрунтування концептуальних засад, методологічного дизайну та функціоналу навчально-аналітичного е-порталу U-MARC4OS, розробленого із застосуванням ШІ для забезпечення персоналізованого розвитку дослідницьких компетенцій вчених в умовах відкритої науки на основі динамічного самооцінювання та інтегрованого мікронавчання. Об'єктом дослідження є застосування ІКТ в системі формування, оцінювання та розвитку дослідницьких компетентностей вчених. Предмет дослідження – концептуальні основи, методологічний дизайн та функціонал навчально-аналітичного е-порталу U-MARC4OS, створеного із застосуванням ШІ-сервісу Google Gemini на платформі Canvas LMS для формування, оцінювання та розвитку дослідницьких компетентностей вчених в умовах відкритої науки. Е-портал розроблено на основі науково-обгрунтованої «Універсальної матриці оцінювання дослідницьких компетентностей вчених у умовах відкритої науки» (U-MARC4OS), яка узагальнює перелік компетентностей дослідницької діяльності вчених, представлених у сучасних європейських рамкових документах.

**Ключові слова.** Дослідницька діяльність, відкрита наука, компентність, європейські методики, універсальна матриця, е-портал, оцінювання (самооцінювання) і розвиток.

# E-PORTAL "U-MARC4OS": INTEGRATION OF DYNAMIC SELF-ASSESSMENT AND AI-ADAPTED MICRO-LEARNING FOR DEVELOPMENT OF RESEARCH COMPETENCES IN THE CONTEXT OF OPEN SCIENCE

**Petroye O.[1], Drach I. [2]**
[1]SHEI «University of Educational Management» of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2] Institute of Higher Education of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The purpose of the study is to substantiate the conceptual foundations, methodological design and functionality of the educational and analytical e-portal U-MARC4OS, developed using AI to ensure personalised development of research competencies of scientists in open science based on dynamic self-assessment and integrated microlearning. The object of the study is the use of ICT in the system of formation, assessment and development of research competencies of scientists. The subject of the study is the conceptual foundations, methodological design and functionality of the educational and analytical e-portal U-MARC4OS, created using the Google Gemini AI service on the Canvas LMS platform for the formation, assessment and development of research competencies of scientists in open science. The e-portal was developed on the Canvas LMS platform using the Google Gemini artificial intelligence service based on the scientifically sound "Universal Matrix for Assessing Research Competencies of Scientists in Open Science" (U-MARC4OS), which summarizes the list of indicators for assessing the research activities of scientists presented in modern European framework documents.

**Keywords.** Research activity, open science, competence, European methodologies, universal matrix; e-portal, assessment (self-assessment) and development.

**Вступ.** Підходи до дослідницької діяльності зазнають значних змін в умовах відкритої науки. Динамізм та масштабність трансформацій у дослідницькому просторі в контексті відкритої науки зумовлюють диверсифікацію завдань та функцій, посилюють вимоги до дослідницьких компетентностей вчених. Критичною важливою для розвитку цифрових та дослідницьких компетентностей вчених в умовах відкритої науки є можливість

персоналізованого підходу до навчання. На окрему увагу у цьому контексті заслуговує використання технологій ШІ для формування та розвитку дослідницьких компетентностей вчених [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Дослідження розкриває зміст та потенціал навчально-аналітичного е-порталу "U-MARC4OS", створеного із застосуванням ШІ-сервісу Google Gemini на платформі Canvas LMS. Е-портал призначений для оцінювання, самооцінювання та розвитку дослідницьких компетентностей вчених на основі опитувальника “Універсальної матриці оцінювання дослідницьких компетентностей вчених в умовах відкритої науки» (Universal Matrix of Assessment of Research Competencies of Scientists in context of Open Science, U-MARC4OS).

**Постановка задачі.** Аналіз останніх наукових публікацій та сучасних методологічних розробок демонструє значну різноманітність точок зору, відсутність консенсусу та розрив в існуючих позиціях (Saint et al., 2024) [1] щодо підходів як до структури компетентностей, так і до їх оцінювання, доводить необхідність врахування складності та багатовимірності дослідницької діяльності вчених (Marouf & Turin, 2025) [3] та поєднання різних методологій для забезпечення всебічної та об'єктивної оцінки дослідницьких компетентностей вчених у контексті відкритої науки (Petroye, O., & Drach, I., 2025) [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**]. Універсальна матриця «U-MARC4OS», створена на основі узагальнення показників компетентностей провідних європейських методик, вирішує проблему фрагментарності представлення компетентностей в окремих методиках, враховує циклічний характер та багатовимірність дослідницької діяльності, забезпечує можливість диференційованої оцінки (самооцінки) дослідницьких компетентностей вчених на різних етапах їхньої дослідницької кар'єри [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**]. Розроблений із застосуванням ШІ-сервісу Google Gemini на платформі Canvas LMS навчально-аналітичний е-портал, заснований на універсальній матриці U-MARC4OS, пропонує комплексне науково обґрунтоване вирішення проблеми персоналізованого симстемного підходу до формування, оцінювання та розвитку дослідницьких компетентностей вчених в умовах відкритої науки шляхом інтеграції динамічного самооцінювання та ШІ-адаптованого мікронавчання.

**Мета роботи.** Метою дослідження є обгрунтування концептуальних засад, методологічного дизайну та функціоналу навчально-аналітичного е-порталу U-MARC4OS, розробленого із застосуванням ШІ для забезпечення персоналізованого розвитку дослідницьких компетенцій вчених в умовах відкритої науки на основі динамічного самооцінювання та інтегрованого мікронавчання.

**Основна частина.** Навчально-аналітичний е-портал U-MARC4OS розроблено на платформі Canvas LMS із застосуванням ШІ-сервісу Google Gemini на основі науково-обгрунтованої «Універсальної матриці оцінювання дослідницьких компетентностей вчених у умовах відкритої науки» (U-MARC4OS) [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**]. Універсальна матриця узагальнює перелік показників оцінювання дослідницької діяльності вчених, представлених у сучасних європейських рамкових документах: “European Skills, Competences, Qualifications and Professions, Research and Development Manager” (ESCO RDM); “European Skills, Competences, Qualifications and Professions, University Research Assistant” (ESCO URA); “European Skills, Competences, Qualifications and Professions, Transversal Skills and Competences” (ESCO TSC); “European Competence Framework for Researchers” (RESEARCH COMP) and “OPUS Researcher Assessment Framework” (OPUS RAF) [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Структуру універсальної матриці U-MARC4OS формують 143 показники компетентностей, об’єднані за функціональними ознаками у 21 категорію, з подальшим їх розподілом за 5 етапами життєвого циклу дослідження в умовах відкритої науки (концептуалізація та планування; управління ресурсами; реалізація дослідження; поширення та комунікація; вплив та впровадження). Шкала оцінювання універсальної матриці розрізняє п’ять рівнів розвитку компетентності вченого: відсутній (0 балів); базовий (1 бал); середній

(2 бали); високий (3 бали); експертний (4 бали) [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Навчально-аналітичний е-портал: (1) містить опис концептуальних положень U-MARC4OS; (2) висвітлює ситему дослідницьких компетентностей, яка інтегрує 143 узагальнені індикатори компетентностей, класифікованих у 21 категорію, об'єднаних за 5 ключовими етапами життєвого циклу дослідницької діяльності (концептуалізація і планування; ресурсне забезпечення; дослідження та аналіз; поширення результатів та наукові комунікації; впровадження результатів та посилення впливу); (3) інструменти інтегрованого оцінювання/самооцінювання на основі опитувальника «Універсальної матриці оцінювання дослідницьких компетентностей вчених в умовах відкритої науки "U-MARC4OS"»; (4) ШІ-генератор результатів та алгоритмічного плану персональних рекомендацій; (5) система мікронавчання на основі флеш-карт, тестування та перевірки знань з дослідницької діяльності в умовах відкрпитої науки [6].

**Висновки.** Функціонал е-порталу U-MARC4OS забезпечує можливість динамічного оцінювання (самооцінювання) компетентностей дослідницької діяльності вчених в умовах відкритої науки у режимі реального часу, надає доступ до контенту мікронавчання, адаптованого до професійного профілю та кар'єрного етапу вченого. Ключовими перевагами та принципами U-MARC4OS є: відкрита наука (включає вимоги відкритої науки такі як відкриті дані, відкритий доступ до публікацій, відкриті комунікації та соціальний вплив); комплексність (інтеграція компетентностей відкритої науки в загальну систему компетентностей дослідницької діяльності вчених, де відкритість розглядається не як додаткова опція, а виступає фундаментальним методом проведення досліджень); циклічність (компетентності дослідницької діяльності структуровані за 5 етапами життєвого ітеративного циклу дослідницької діяльності); персональна зорієнтованість (забезпечує самооцінювання, сприяє формуванню персональних траєкторій розвитку дослідницьких компетентностей); багаторівневість (пропонує 5-ти рівневу шкалу оцінювання) та ін..

## Список використаних джерел


1. European Commission. Directorate General for Research and Innovation. (2025). Infrastructures for AI in science: Mutual learning exercise. Publications Office. DOI: https://doi.org/10.2777/8581577
2. Saint, V., Detering, B., Franke, A., Eger, H., Oppenberg, J., Rohleder, S., & Bozorgmehr, K. (2024). Key competencies for global health research: Systematic literature review and mapping. European Journal of Public Health, Volume 34, Issue Supplement_3, November 2024, ckae144.1223. DOI: https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae144.1223
3. Marouf, A. A., & Turin, T. C. (2025). Multi-dimensional research impact assessment through bibliometrics, altmetrics, semantometrics, and webometrics. Bangabandhu Sheikh Mujib Medical University Journal, 18(2), e79811. DOI: https://doi.org/10.3329/bsmmuj.v18i2.79811
4. Petroye O.M., Drach I.I. (2025). Methodology for Assessing Research Competencies of Scientists. Scientific and Informational Materials. 22 p. Zenodo. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.17215878
5. Petroye, O., & Drach, I. (2026). Universal Matrix for Assessment of Research Competencies of Scientists in context of Open Science "U-MARC4OS". Zenodo. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19154424
6. Petroye O., Drach I. (2026). U-MARC4OS: Universal Matrix of Assessment of Research Competencies of Scientists in context of Open Science. Informational Materials of the Educational and Analytical E-Portal. Zenodo. 25 p. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.18488660

# FROM UNIVERSITY TO FREELANCE: IDENTIFYING IT COMPETENCY GAPS FOR IMPROVING PROFESSIONAL TRAINING PROGRAMS

**Antoniuk D., Vakaliuk T., Morozov A., Bolotina V.**
Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine

**Abstract**. This paper presents findings from a national competency survey of 129 Ukrainian IT freelancers conducted within the ENTEEF project (2024-1-PL01-KA220-HED-000248152). Gap analysis between perceived importance and self-assessed proficiency reveals critical deficiencies in self-promotion, domain expertise, negotiation, and stress management. Employer perspectives add task prioritisation and business relationship building as priority gaps. Cluster analysis identifies five freelancer profiles, with early-career learners comprising over 31% of the sample. The findings suggest that higher education IT curricula inadequately address professional and entrepreneurial competencies required for successful freelance careers, and propose directions for curriculum improvement.

**Keywords**: IT freelancers, competency gaps, higher education, professional training, freelance market, Ukraine.

**Introduction**. The rapid growth of the global freelance economy has transformed the IT employment landscape. In Ukraine, freelancing has become a primary career pathway for a significant portion of IT graduates, with platforms such as Upwork, Freelancer.com, and Fiverr providing access to international markets. However, a fundamental question arises: does higher education adequately prepare IT students for independent professional activity in digital labour markets?

Previous research on IT education in Ukraine has focused predominantly on technical curriculum content, with limited attention to the entrepreneurial, communicative, and self-management competencies that freelance work demands [1]. This gap between formal training and market requirements represents both an educational and an economic challenge, particularly given that Ukraine's IT sector is one of the country's primary sources of foreign currency revenue.

**The purpose of the work** is to identify critical competency gaps between IT graduates entering freelance markets and the expectations of employers who hire freelancers, and to propose evidence-based directions for improving higher education IT training programs.

**Formulation of the problem**. Ukrainian higher education IT programs have historically emphasised technical skill development — programming, system design, and algorithmic problem-solving — while allocating limited instructional time to professional self-management, client communication, business relationship development, and entrepreneurial competencies. As freelancing becomes an increasingly common career trajectory for IT graduates, this imbalance creates measurable deficiencies in graduate readiness for independent professional activity.

**Solving the problem**. Data were collected within the ENTEEF project (Fostering Entrepreneurship through Freelancing, 2024-1-PL01-KA220-HED-000248152) through a structured survey administered to 129 Ukrainian freelancers and 6 companies that engage freelance IT services. The competency framework encompassed 23 competencies across three domains: Personal Profile, Communication and Teamwork, and Digital Literacy.

The sample is predominantly young (75.19% under 24 years old), male (73.64%), and early-career, with 55.04% reporting less than 1 year of freelancing experience. Software Development and IT services constitute 58.14% of primary activity areas. These characteristics indicate that Ukrainian IT freelancers are largely recent graduates or current students, making the connection to higher education particularly direct.

Gap scores (importance minus proficiency) reveal the most critical deficiencies. From the freelancer perspective, the largest gaps are in Self-Promotion and Personal Branding (0.75), Domain Expertise (0.66), Negotiation (0.57), and Stress Management (0.53). From the employer

perspective, the most critical gaps are: Task Prioritisation (1.00), Business Relationship Building (0.83), and Stress Management (0.83). Communication and Teamwork competencies exhibit the largest average domain-level gaps from both perspectives (freelancers: 0.39; employers: 0.56).

Cluster analysis (k-means, k=5) identified five freelancer profiles. Early-Career Learners (31.78%) display below-average competencies and limited experience, directly corresponding to recent graduates. Digital-Native Professionals (22.48%) demonstrate the highest overall competence levels, suggesting that some graduates do develop comprehensive skill sets. Traditional Experts (31.01%) show strong domain expertise but moderate digital literacy. The presence of a Struggling Mid-Careers cluster (3.88%) indicates that a minority of graduates face persistent difficulties in establishing viable freelance careers.

ANOVA results confirm that education level explains 53% of the variance in learning-orientation gaps and 26% of the variance in domain expertise proficiency, demonstrating measurable educational effects on freelance readiness. Master's degree holders rate their domain expertise 1.55 points higher than bachelor's degree holders on a 5-point scale, indicating that advanced education does develop a competitive advantage.

The findings suggest three priority directions for IT higher education programs: (1) integration of professional self-management modules addressing time organisation, stress resilience, and task prioritisation; (2) introduction of entrepreneurial communication training covering client negotiation, relationship management, and personal branding; (3) development of applied domain expertise through project-based learning that simulates freelance engagement conditions.

**Conclusion**. The national competency survey reveals systematic misalignments between IT higher education outcomes and freelance market requirements in Ukraine. Critical gaps in self-promotion, negotiation, task prioritisation, and stress management indicate that current curricula provide insufficient preparation. The predominance of early-career freelancers in the sample confirms that the transition from university to the freelance market is a critical period where educational preparation directly determines professional viability. Addressing identified competency gaps through targeted curriculum revision represents a measurable opportunity to improve graduate employability and strengthen Ukraine's competitive position in global IT labour markets.

**Acknowledgement.** Co-funded by the European Union (Project no 2024-1-PL01-KA220-HED-000248152). Views and opinions expressed are, however, those of the author or authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Foundation for the Development of the Education System. Neither the European Union nor the entity providing the grant can be held responsible for them.

## References

1. Saienko, V., Kurysh, N., & Siliutina, I. (2022). Digital Competence of Higher Education Applicants: New Opportunities and Challenges for Future Education. *Futurity Education*, *2*(1), 45–54. https://doi.org/10.57125/FED/2022.10.11.23

# GENERATIVE AI IN HIGHER EDUCATION: A TWO-TRACK HYBRID MODEL FOR SUSTAINING COGNITIVE ENGAGEMENT

**Bazhmina E.A.[1], Shyrokorad D.V.[1], Zapolskykh S.P.[2]**

[1] National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine

[2] Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine

**Abstract.** The paper presents a quasi-experimental study of a two-track hybrid model for responsible use of generative artificial intelligence in higher education. The model was tested with 353 students in engineering graphics and practical foreign language courses. It combines permission to use AI with mandatory attribution, prompt documentation, student reflection, and teacher verification. The technical track used instructor-approved NotebookLM modules and standards-based drawing tasks; the humanities track used prompt portfolios and chatbot debates. Compared with archival cohorts, the model was associated with improved standards compliance, stronger argumentation, better prompt revision, and a realistic reduction in teacher verification time. The findings suggest that generative AI can support learning when it is treated not as an invisible substitute for student work, but as a transparent object of critique and discipline-specific judgement.

**Keywords:** generative AI; higher education; cognitive engagement; assessment redesign; prompt engineering; teacher verification.

**Introduction.** Generative AI has become a normal element of students' academic practice. It is used for explanation, translation, summarisation, drafting, coding support, and preparation of written assignments [1]. This creates a methodological difficulty for higher education: if a final product can be generated without evidence of the student's own thinking, the task no longer measures the intended learning outcome.

Recent studies therefore recommend not only prohibition, but also assessment redesign. Prompt engineering is increasingly considered a teachable academic skill [3], while broader reviews emphasise transparent policies, AI literacy, critical thinking, and discipline-sensitive learning design [4-7]. In this context, the key question is not whether AI was used, but whether the student can document, evaluate, and justify that use.

**Work goal.** The goal of the study is to test a two-track hybrid model that allows controlled AI use while preserving cognitive engagement. The model was designed to make the learning process visible through prompt records, AI-output fragments, student commentary, and teacher verification.

**Problem statement.** The research problem is the tension between AI availability and the reliability of assessment. In technical disciplines, students may have unequal access to professional software and hardware. In humanities courses, polished AI-assisted texts may hide weak reasoning. A single institutional rule cannot solve both problems. The proposed model, therefore, keeps one shared verification logic but adapts the learning tasks to disciplinary conditions.

**Main part.** The study used a quasi-experimental design with archival comparison groups. The experimental sample included 353 students during the 2025-2026 academic year: 137 students in engineering graphics at National University Zaporizhzhia Polytechnic and 216 students in practical foreign language courses at Zaporizhzhia National University. The comparison cohorts were selected from the same courses and assessed with comparable rubrics.

Both tracks used an attribution bundle. Students submitted the initial prompt, a fragment of AI output or interaction log, and a short explanation of what was accepted, corrected, or rejected. Teachers then applied discipline-specific rubrics. This approach corresponds to process-oriented assessment frameworks, where AI use is permitted only when the student's judgement remains visible [2].

In the technical track, students with limited CAD access used NotebookLM modules based on instructor-created video explanations. Students with software access completed standards-based drawing tasks. In the humanities track, conventional essays were replaced with prompt portfolios

and chatbot debates. These tasks required students to identify weak prompts, improve them, compare AI responses, and defend or reject generated claims. Similar work on AI course assistants shows that positive learning effects are plausible when AI supports reflection and feedback rather than replacing student effort [8].

Table 1

**Comparative outcomes of the two-track hybrid model**

| Indicator | Comparison cohort | Hybrid model | Effect/change |
|---|---|---|---|
| Engineering standards compliance, % | 68.8 ± 12.1 | 84.3 ± 8.8 | d = 1.47; +22.5% |
| Argumentation quality, 1-10 | 5.9 ± 1.8 | 7.3 ± 1.4 | d = 0.87; +23.7% |
| Prompt revision/creativity, 1-10 | 5.6 ± 2.0 | 6.9 ± 1.6 | d = 0.72; +23.2% |
| Metacognitive reflection, 1-10 | 6.2 ± 2.0 | 6.8 ± 2.0 | d = 0.30; +9.7% |
| Verification time - technical, min | 21.1 ± 9.6 | 9.0 ± 4.1 | -57.3% |
| Verification time - humanities, min | 18.3 ± 10.7 | 6.7 ± 4.5 | -63.4% |

The results show a strong but not unrealistic effect in engineering standards compliance and medium effects in the humanities indicators. Teacher verification time decreased because the attribution bundle made the learning process easier to inspect; however, final academic judgement remained with the teacher. Completeness of attribution was positively associated with metacognitive reflection ($r = 0.69$, $p < 0.001$), which supports the assumption that visible AI use can strengthen, rather than replace, reflective learning.

**Conclusions.** The two-track hybrid model shows that generative AI can be integrated into higher education without reducing assessment to machine-generated output. Its central condition is visibility: prompts, AI responses, revisions, and student explanations must become assessable evidence.

The model is especially useful in contexts with uneven institutional conditions. It supports technical learning when software access is limited and strengthens humanities assessment by shifting attention from polished text to reasoning, critique, and argumentation. Further research should test the model with concurrent control groups, inter-rater reliability checks, and longer-term learning indicators.

## References


1. UNESCO. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO; 2023.
2. Perkins M, Furze L, Roe J, MacVaugh J. The Artificial Intelligence Assessment Scale (AIAS): A framework for ethical integration of generative AI in educational assessment. Journal of University Teaching and Learning Practice. 2024;21(6). doi:10.53761/q3azde36.
3. Lee D, Palmer E. Prompt engineering in higher education: a systematic review to help inform curricula. International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2025; 22:7. doi:10.1186/s41239-025-00503-7.
4. Tillmanns T, Salomao Filho A, Rudra S, Weber P, Dawitz J, Wiersma E, Dudenaite D, Reynolds S. Mapping Tomorrow's Teaching and Learning Spaces: A Systematic Review on GenAI in Higher Education. Trends in Higher Education. 2025;4(1):2. doi:10.3390/higheredu4010002.
5. Katsamakas E, Pavlov OV, Saklad R. Artificial Intelligence and the Transformation of Higher Education Institutions: A Systems Approach. Sustainability. 2024;16(14):6118. doi:10.3390/su16146118.
6. Su R, Liu C, Ma X, Chen R, Luo Y, Chen Y. Using Artificial Intelligence to Reshape Higher Education Such That It Is in Line with Sustainability: A Systematic Review of Pedagogical and Curricular Innovations. Sustainability. 2026;18(5):2360. doi:10.3390/su18052360.
7. Balart T, Diaz B, Shryock K. A Systematic Literature Review on the Pedagogical Implications and Impact of GenAI on Students' Critical Thinking. Algorithms. 2026;19(3):179. doi:10.3390/a19030179.
8. Hanshaw G, Vance J, Brewer C. Exploring the Effectiveness of AI Course Assistants on the Student Learning Experience. Open Praxis. 2024;16(4):627-644. doi:10.55982/openpraxis.16.4.719.

# WHEN THINKING IS OUTSOURCED: AI DEPENDENCY IN HIGHER EDUCATION

**Frank Angelo Pacala**
Guangdong Shunde Desheng School, Foshan City, China

**Abstract**. The use of AI in higher education has skyrocketed in the last five years, and with it has come an increase in AI dependency among university and college students. Using the PRISMA framework, this review identified eight included studies that met the inclusion and exclusion criteria. The results revealed that there is no unifying definition of AI dependency, and that most studies measured signals that trigger it. Connected to this, studies found that cognitive offloading and diminished independent thinking are the widely accepted effects of AI dependence, followed by erosion of self-regulation and metacognitive skills. When identifying factors that contribute to AI dependence, the researchers categorized them as individual, technological, and contextual. It is concluded that AI dependency is already a serious concern in higher education, and practical and research-based solutions to curb this problem are needed.

**Keywords**: Artificial Intelligence, AI dependency, overreliance, higher education, cognitive offloading, systematic review

**Introduction**. The meteoric adoption of Generative Artificial Intelligence (GenAI) tools in higher education has fundamentally transformed how students engage in academic tasks. Since the first release of ChatGPT, the first GenAI to come to public attention, in 2022, its use among students at various levels has skyrocketed. There is even a study showing that more than half of the school population is connected to the said technology and uses it as a homework assistant, for coding, and even for revising for examinations [1]. Given their undoubted benefits, educational institutions, faculty, and researchers have explored how to use these tools in the classroom to enhance students' engagement and learning outcomes. However, Hon [2] argued that a related concern has emerged: overreliance on these technologies may undermine the outcomes (e.g., critical thinking, deep learning) that higher education aims to achieve.

**The purpose of the work** is to address the issues underlying AI dependency; the researchers conducted this systematic review to synthesize academic papers on how they measured the construct and which factors they found contribute to its development. Also, this paper aimed to harmonize the results on the effects of AI dependency on students' learning outcomes in higher education and to identify gaps in these studies.

**Formulation of the problem**. To achieve this purpose, this systematic review sought answers to the following research objectives: to describe the scope and characteristics of research on AI dependency and overreliance among university students; to examine whether AI dependency or overreliance is operationalized and measured in higher education studies; to synthesize the reported effects of AI dependency or overreliance on university students' learning outcomes and academic behaviors; to categorize the factors contribute to AI dependency or overreliance into individual, contextual, or technological factors among university students; and to identify the gaps exist in the current literature, and what directions should future research take on AI dependency in higher education.

**Solving the problem**. This study used the Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) framework to guide the paper in answering the research questions on AI dependency. PRISMA is widely used in the social sciences field because it offers a structured, clear, and reproducible method via thorough reporting of results [3,4].

As shown in Figure 1, three studies measured AI dependence as a latent variable. For instance, Kalimira & Jazayeri [5] contended that the definition of AI dependency should be broadened to include reliance on AI during academic tasks, forming emotional attachments, and, worst of all, a lack of self-control over one's own learning. Two studies used qualitative data to assess operational dependence on AI [6]. Interviews and thematic analyses were employed to gather data on AI reliance.

The most frequently revealed effect of AI dependency is cognitive offloading and diminished independent thinking, as reported by four studies [5, 7, 8, 9]. Diminished independent thinking

affects users' metacognition, which is revealed by three studies [5, 6, 10]. Le et al. [6] raised concerns that the increased use of AI systems may lead to metacognitive laziness among students. Three studies claimed that greater knowledge of AI does not serve as a cover for becoming reliant on it.

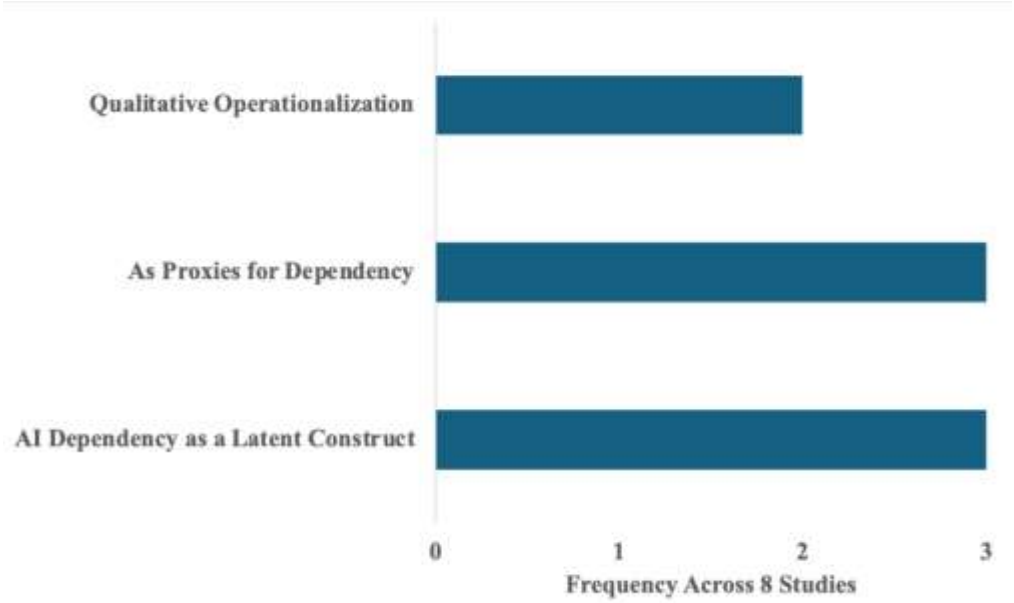



Fig. 1. AI Dependency in Higher Education is Operationalized in 3 Categories

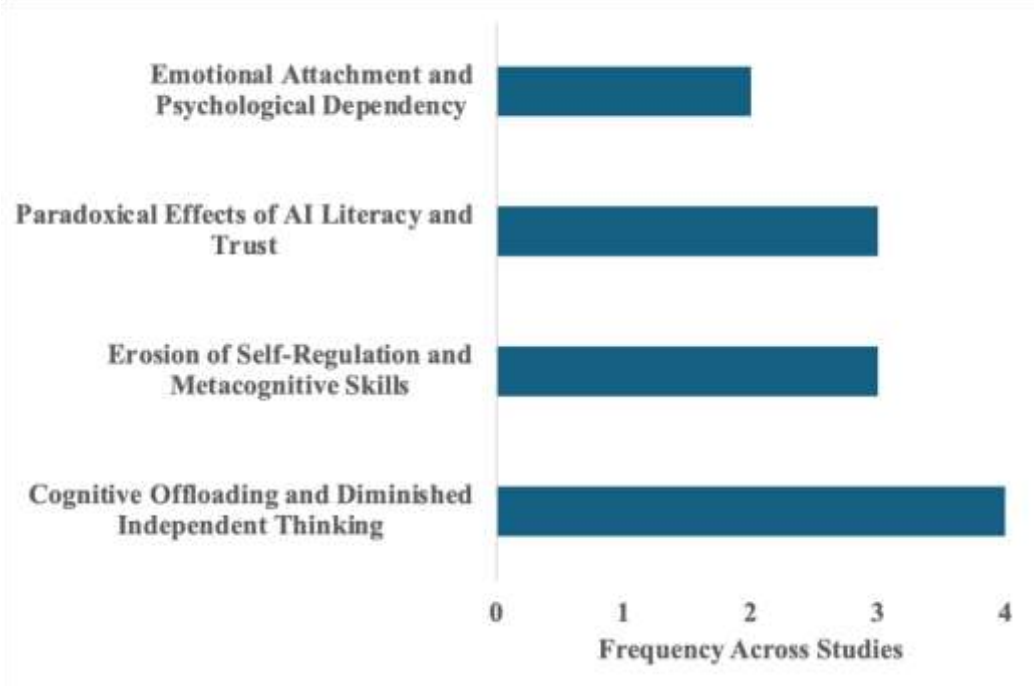



Fig. 2. Reported effects of AI dependency or overreliance

As shown in Figure 3, the individual factors were hedonic motivation, affective states, English Language proficiency, and prior experience. Hedonic motivation meant that students enjoy the use of AI more than sense its usefulness. Moreover, the feelings of loneliness, anxiety, and the need for companionship among students drove them to seek the comfort of AI. This process leads students to desire the use of AI, making them dependent on it [9].

The next group of factors is the contextual factors, which consist of social influence, economic pressures, and pedagogical design. In most of the included papers, trust is the main factor in using an AI system, outweighing the influence of a specific group. Technological factors also played a

significant role in how university/college students became dependent on AI systems. The AI's interface and functionality are the key attractors for students, especially those who interact with it and find it engaging.

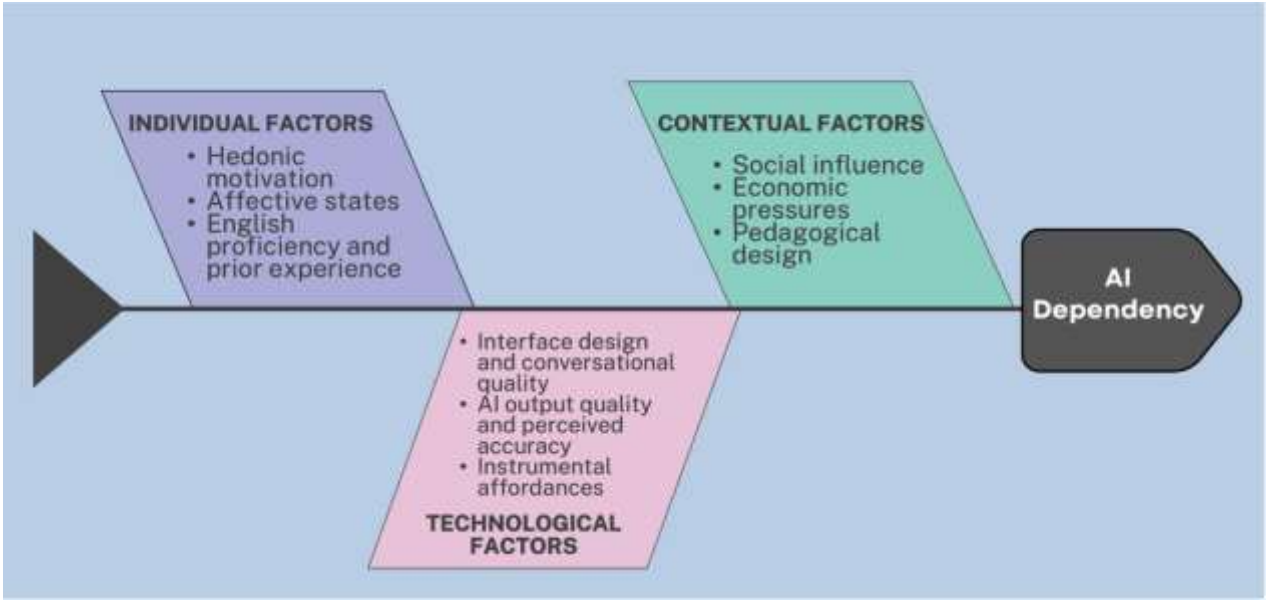



Fig. 3. Factors Affecting the Degree of Dependence on AI in Higher Education

**Conclusion**. The topic of Artificial Intelligence dependency in higher education is a rapidly growing and developing area of research. This review found that AI dependency is currently not a single concept but rather composed of different factors, including individual factors (such as trust, emotions, and hedonic motivations), technological factors (such as AI features and its interface), and contextual factors (e.g., social influence and peer and economic pressures. Across all eight studies, the common finding is that AI overreliance is less about how students use AI and more about how it affects students' mood, emotions, and thinking. The reported effects extend beyond behavioral (e.g., reduced attendance and newly formed habits), cognitive (e.g., diminished independent thinking and offloading), and affective (e.g., emotional attachment to the AI) dimensions. These effects only mean that excessive reliance on AI can pose a threat to the deeper cognitive and relational competencies that higher educational institutions (HEIs) seek to cultivate.

Despite these vital contributions to the body of knowledge, this systematic review identified gaps that persist across the reviewed papers. The most common is the lack of diversity among the participants in the studies, accounting for seven of eight reports. Studies also relied most on self-reported data, and longitudinal studies were absent; both were found in six of the eight studies. Also, four studies argued that intervention to reduce the effects of overreliance is needed as soon as possible. Since the definition of AI dependency was scattered across various factors, an instrument to measure the construct is not currently found in the included papers.

## References

1. Botta, C., Robertson, J., McMellon, C., Lawson, J., Ajala, J., Lugo Gonzalez, S., ... & Tang, J. (2025, September). Secondary students as co-researchers on generative AI in learning: Empowering youth to shape national education policy. In *Proceedings of the 2025 Conference on UK and Ireland Computing Education Research* (pp. 1-7). https://doi.org/10.1145/3754508.3754519
2. Hon, K. (2026). Generative AI in higher education: A systematic review of its effects on learning outcomes and academic performance. *Journal of Educational Technology Systems, 54*(3), 537-560. https://doi.org/10.1177/00472395251400089
3. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, *372*. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

4. Pacala, F. A., Turaev, A., Sharipovich, U. B., & Addumuminov, A. (2025). Professional development programs for STEM in-service-teachers in Arduino technology: a systematic review. *Information Technologies and Learning Tools*, *109*(5), 237. DOI:10.33407/itlt.v104i6.5756
5. Kalimira, A. M., & Jazayeri, K. (2026). From Social Drivers to Sustainable AI Usage and Dependency in Higher Education: Roles of Trust, Perceived Competence, and Perceived Intelligence. *Sustainability*, *18*(3), 1598. https://doi.org/10.3390/su18031598
6. Le, H., Shen, Y., Li, Z., Xia, M., Tang, L., Li, X., ... & Fan, Y. (2025). Breaking human dominance: Investigating learners' preferences for learning feedback from generative AI and human tutors. *British Journal of Educational Technology*, *56*(5), 1758-1783. Doi: 10.1111/bjet.13614.
7. Hsu, L. (2025). Entangled cognition in EFL education: The role of generative AI. *Contemporary Educational Technology*, *17*(4), ep619. https://doi.org/10.30935/cedtech/17621
8. Wijaya, T. T., Yu, Q., Cao, Y., He, Y., & Leung, F. K. (2024). Latent profile analysis of AI literacy and trust in mathematics teachers and their relations with AI dependency and 21st-century skills. *Behavioral Sciences*, *14*(11), 1008. https://doi.org/10.3390/bs14111008
9. Zhai, N., Ma, X., & Ding, X. (2025). Unpacking AI Chatbot Dependency: A Dual-Path Model of Cognitive and Affective Mechanisms. *Information*, *16*(12), 1025. https://doi.org/10.3390/info16121025
10. Ghimire, A., & Qiu, Y. (2026). Recalibrating the value of presence: A qualitative study on generative AI, attendance, and professional formation in undergraduate nursing. *Nurse Education Today*, 107111. https://doi.org/10.1016/j.nedt.2026.107111

# AI-DRIVEN ACADEMIC INNOVATION: OPPORTUNITIES, CHALLENGES, AND THE EDUCATIONAL IMPACT OF GOOGLE GEMS

**Hrechukha L.[1], Pavlenko O.[2], Leshchenko H.[1], Sovetna A.[1], Butko N.[3]**
[1]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
[2]Mariupol State University, Kyiv, Ukraine
[3]Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstruct.** The rapid evolution of generative artificial intelligence has introduced a paradigm shift in higher education, transitioning from general-purpose large language models to specialized, autonomous AI-agents. This study critically analyzes Google Gems, a novel tool within the Gemini ecosystem that allows users to create customized, context-persistent digital assistants. This research evaluates the gems' potential to foster active, inquiry-based learning, streamline academic workflows, and enhance the acquisition of specialized competencies. Applying a dual-perspective framework, the paper offers specific AI-agents (gems) designed to make teaching more effective and studying more resultative. For educators, these agents are based on instructional design and differentiated feedback. These tools provide one-on-one help and teach students to think critically about their own learning. Additionally, the research highlights the risks of adding AI to education, specifically focusing on data privacy, unfair systems, and the worry that students will rely too heavily on the AI. The findings suggest that when deployed as "agentic partners" rather than mere content generators, Google Gems can significantly enhance the resultative nature of the modern higher education process.

**Keywords:** AI-agents, agentic AI, cognitive over-dependence, higher education, Google Gems, instructional design, large language models (LLMs), machine translation post-editing (MTPE).

**Introduction.** At present, in the context of rapid knowledge digitalization and the acceleration of the educational process, higher educational establishments are beginning to integrate artificial intelligence into their syllabi as a core subject. The initial phase of AI adoption in academia is dominated by general-purpose large language models (LLMs). However, despite their power, these models often lack the contextual permanence required for specialized academic tasks. A significant evolution in this domain is the introduction of "agentic AI."

Unlike traditional LLMs that depend entirely on continuous human prompting, agentic AI systems possess a degree of autonomy, enabling them to plan, execute multi-step workflows, and interact with external digital environments to achieve predefined objectives. This transition from passive information retrieval to active task execution addresses the inherent limitations of general-purpose models by establishing contextual permanence and workflow integration. In highly specialized academic fields, such as applied linguistics and translation studies, the integration of agentic AI is particularly transformative. These autonomous agents can move beyond isolated text generation to manage complex machine translation post-editing (MTPE) pipelines and interface directly with industry-standard computer-assisted translation (CAT) platforms. By independently verifying terminology across specialized corpora, cross-referencing stylistic guidelines, and adapting to nuanced linguistic frameworks over time, agentic systems bridge critical gaps in navigating language barriers. They provide students with a dynamic, context-aware learning environment that accurately mirrors modern professional workflows. Furthermore, the deployment of agentic AI facilitates a more rigorous approach to the continuous improvement of higher education curricula. By autonomously analyzing evolving industry standards, academic literature, and quality assurance frameworks, these systems can assist program coordinators in identifying competency gaps within educational programs. Agentic AI serves not merely as a pedagogical tool, but as a structural component of the academic ecosystem, fundamentally redefining how modern professional competencies are cultivated, assessed, and aligned with the demands of the digital economy. Consequently, platforms like Google Gemini, specifically the "Gems" feature, enable the creation of such personalized agents. Google Gems allow users to create customized, role-specific digital assistants by defining a permanent persona, a fixed set of operational instructions, and a specific knowledge base. Unlike a standard chat interface that resets each session, a Gem retains its

systemic instructions, functioning as a personal assistant capable of performing diverse tasks based on predefined parameters and uploaded data.

**Purpose of the Work.** The objective of this study is to investigate the functional capabilities of Google Gems (both pre-configured and custom-made) and to outline how educators and students can utilize them to achieve specific academic goals. Specifically, the work aims to demonstrate how AI agents can facilitate knowledge acquisition and enhance practical professional skills training across various disciplines, thereby making teaching more effective and learning more productive.

**Formulation of the Problem.** Generative AI has rapidly become an inseparable part of higher education. Conversely, using it without a clear pedagogical strategy often hinders rather than assists student learning (Crompton & Burke, 2023). Currently, there is a significant risk of students relying on AI for complex cognitive tasks, which may impede genuine skill development (Lodge et al., 2023). Students frequently interact with LLMs to solve various tasks without ensuring the accuracy of the information provided. Furthermore, most AI chatbots lack long-term memory for complex information, particularly in free versions. This necessitates constant re-explanation, which interrupts the continuity of the learning process. According to recent research (Dwivedi et al., 2023), due to concerns regarding academic integrity, data protection, and algorithmic bias, it is evident that higher education requires a new strategy for future development. In this context, it is possible to move beyond generic chatbots and develop tailored, intelligent assistants within existing LLMs. Such assistants could support specific disciplinary requirements, promote independent critical thinking, and maintain university-level academic standards.

**Solving the Problem.** To address these systemic challenges, this study proposes a dual-perspective framework for integrating Google Gems into the educational environment as specialized "agentic partners." Google accounts provide access to a list of ready-made Gems designed for general tasks; these can be duplicated and modified to meet individual requirements. Additionally, it is possible to create entirely new agentic partners. Developing a suitable Gem capable of providing recommendations, practicing thematic vocabulary, or refining resumes takes minimal time. The primary requirement is a clear conceptualization of the agent's role and a well-structured prompt containing all necessary instructions. Customizing AI agents for specific academic roles effectively addresses the shortcomings of standard chatbot interfaces. Educators, for instance, can design Gems to optimize their workload by crafting instructional materials, building rubrics, and delivering targeted formative feedback. Customized Gems could also be utilized during university admission campaigns to introduce the specifics of educational programs to prospective students. Students can benefit from Gems, designed as interactive tutors that stimulate critical thinking and simulate professional environments. Through this strategic deployment, AI becomes a true collaborative partner - one that guides complex problem-solving rather than merely providing final answers.

**Conclusion.** Customized AI agents like Google Gems offer a clear path beyond the limitations of generic AI in higher education. By providing tailored, ongoing support with contextual memory, these tools can significantly enhance both teaching methodologies and student achievements. However, realizing this impact requires intentional design and proficiency in prompt engineering. Simultaneously, academic integrity must be prioritized, and ethical concerns must be actively addressed. If tools like Google Gems are deployed thoughtfully as collaborative partners rather than automated shortcuts, they can contribute to a more innovative and results-driven educational system.

## References


1. Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: the state of the field. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20(1), 22. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8
2. Dwivedi, Y. K., et al. (2023). "So what if ChatGPT wrote it?" Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 71, 102642. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642
3. Lodge, J. M., Howard, S., & Bearman, M. (2023). Evaluating learning in the age of generative artificial intelligence. *European Journal of Education*, 58(4), 576-588. https://doi.org/10.1111/ejed.12579

# STUDENTS' PERCEPTIONS OF GOOGLE SITES AS A SUPPLEMENTARY DIGITAL LEARNING TOOL UNDER CONDITIONS OF UNSTABLE POWER SUPPLY

**Ilchenko I.**
National Transport University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The study investigates students' perceptions of Google Sites as a supplementary digital learning tool during the course of Structural Mechanics under conditions of unstable power supply in Kyiv and the Kyiv region. The findings are based on a survey conducted among third-year engineering students (n=63). The results indicate positive evaluations of the site's usefulness and its role in supporting the learning process during power outages. The findings also indicate that students primarily used the mobile version of the site during the course, despite having access to computers or laptops.

**Keywords**: Google Sites, Supplementary Digital Learning Tool, Students' Perceptions, Mobile Learning, Power Outages

**Introduction**. The transformation of higher education in Ukraine within the European educational space has increased the importance of independent student work and emphasized the need for its effective organization through digital technologies. According to contemporary classifications of digital educational tools, supplementary digital tools may support students' independent learning, access to educational materials, and organization of the educational process [1]. Previous studies conducted within the discipline "Modern Information Technologies" have confirmed the effectiveness of Google Cloud Services and educational websites as tools supporting independent student learning in higher education [2]. Furthermore, despite the psychological difficulties and challenges caused by the war, including constant shelling and air raid alerts, Ukrainian students gradually adapted to not only online learning conditions but to the active use of digital technologies in the educational process [3]. In this context, the use of supplementary digital learning tools can be considered not only as a technological solution, but also as an important pedagogical tool for supporting the learning process under unstable power supply.

**The purpose of the work** is to investigate students' perceptions of Google Sites as a supplementary digital learning tool under conditions of unstable power supply through a student survey.

**Formulation of the problem**. The digitalization of higher education requires accessible learning environments that can support the educational process under conditions of unstable power supply. However, students' perceptions of Google Sites remain insufficiently studied.

**Solving the problem**. The course of Structural Mechanics was delivered in a traditional face-to-face weekly lectures and practical classes. The educational process took place under planned and emergency power outages in Kyiv and the Kyiv region during the autumn-winter semester of 2025 caused by damage to Ukraine's energy infrastructure during the ongoing war.

Google Sites was used as a supplementary digital learning tool where students could access lecture presentations, examples from real engineering practice, assignments for individual work, reference materials, and additional educational content related to the discipline. This included examples of real engineering structures, biographies of Ukrainian scientists, and information about student activities organized by the Department of Strength of Materials and Mechanical Engineering at the National Transport University [4]. To measure students' perceptions of Google Sites as a supplementary digital learning tool for the course after completing the discipline "Structural Mechanics", a survey was conducted in December 2025. It included 63 third-year students majoring in Field of Study 19 "Architecture and Construction" (according to the new classification codes – G "Engineering, Manufacturing and Construction"). The survey was conducted using Google Forms with the collection of students' e-mail addresses; however, participants gave consent for anonymized use of their data for research purposes. The results showed that though 81.0% of students have a computer or a laptop that they use for learning purposes, 77.8% of them primarily preferred the mobile version of the site during the course.

Descriptive statistics were calculated using the statistical software Jamovi [5, 6] and are shown in Table 1. The survey responses were measured according to a 10-point rating scale.

Table 1

**Descriptive Statistics (n=63)**

| Indicator: Questions | Mean (M) | Median (Me) | Standard Deviation (SD) |
|---|---|---|---|
| 1. **Usefulness**: How useful was the site during study of the course of Structural Mechanics? *(1 – not useful at all, 10 – extremely useful)* | 8.87 | 10.00 | 1.76 |
| 2. **Impact of Power Outages**: How much did power outages affect the convenience of using the site? *(1 – did not affect at all, 10 – affected significantly)* | 5.67 | 6.00 | 3.31 |
| 3. **Navigation Convenience**: Rate the convenience of the site navigation *(1 – very difficult, 10 – very easy)* | 8.03 | 9.00 | 2.34 |
| 4. **Motivation**: Rate how using the site motivated you to study the course and, possibly, to explore topics beyond the curriculum *(1- did not motivate at all, 10 – motivated significantly)* | 7.25 | 7.00 | 2.07 |

Students generally evaluated the usefulness of the site positively (M = 8.87, Me = 10.0, SD = 1.76). Navigation convenience was also evaluated positively (M = 8.03, Me = 9.00) with slightly higher variability in responses (SD = 2.34). The motivation indicator suggests a moderately positive influence of the site on students' learning motivation (M = 7.25, Me = 7.00, SD = 2.07). The biggest inconsistency was observed for the indicator related to the impact of power outages (M= 5.67, Me = 6.00, SD = 3.31), indicating considerable heterogeneity in students' experiences.

**Conclusion**. The study generally demonstrates positive students' perceptions of Google Sites as a supplementary digital learning tool that has the potential to support the accessibility of education under conditions of energy instability.

Some variability in responses may indicate differences in students' digital experience and the specifics of using the mobile version, both in everyday activities and for learning purposes. Although students positively evaluate the use of the site, the results also suggest that supplementary digital tools alone cannot serve as an independent source of learning motivation.

Differences in the perceived impact of power outages may be related to unequal Internet access, mobile connectivity, availability of backup power sources, and the technical devices used by students.

One limitation of the study is that the survey was not anonymous, which should be considered in future research.

## References


1 Skiba, Y.: Classification of digital tools to support the educational process in higher education. Continuing Professional Education: Theory and Practice, 84(3), 150–161, 2025 https://doi.org/10.28925/2412-0774.2025.3.12

2. Khomenko V.H., Pavlenko L.V., Pavlenko M.P., and Khomenko S.V.: Cloud technologies in informational and methodological support of university students' independent study. ITLT, vol. 77, no. 3, pp. 223–239, Jun. 2020, DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v77i3.2941

3. Y. Sytnykova, T. Petrenko, O. Bezkorovaina, and A. Ptushka: Challenges for universities to online technologies implementation in the conditions of war in Ukraine. ITLT, vol. 99, no. 1, pp. 193–208, Feb. 2024, DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v99i1.5436

4. Ilchenko Iryna, Kh.Sh. Bakhtiyarova, Marchenko Nina. The specifics of implementing an integrated approach while teaching the course "Structural Mechanics" at higher education institutions // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 115. – P. 149-160. – Ukr. DOI: https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.278-291

5. The jamovi project (2025). jamovi. (Version 2.7) [Computer Software]. Retrieved from https://www.jamovi.org.

6. R Core Team (2025). R: A Language and environment for statistical computing. (Version 4.5) [Computer software]. Retrieved from https://cran.r-project.org. (R packages retrieved from CRAN snapshot 2025-05-25).

# GENERATIVE AI IN TRANSLATION: HERMENEUTICAL CHALLENGES OF TRANSLATING THE CONCEPT DISASTER

**Koliasa O.[1], Babelyuk O.[2], Smaglii V.[3]**
[1] University of Sydney, Australia
[2] Lviv State University of Life Safety, Ukraine
[3] Odesa National Maritime University

**Abstract**. The paper synthesises recent empirical and theoretical scholarship on the use of GenAI tools, primarily large language model (LLM)-based systems such as ChatGPT, across four pedagogical domains: literary and general translation, computer-assisted language mediation, audiovisual and subtitle translation, and interpreter training. The study identifies five interconnected themes: the repositioning of human agency within AI-assisted workflows; the primacy of suitability over correctness as the governing evaluative principle; the role of hermeneutical competence and prior professional training; the emotional and communicative challenges of human-AI dialogue; and the ethical and sustainability dimensions of GenAI deployment. The paper argues that across all domains examined, human translators remain indispensable not as error-correctors but as interpretive agents – bearers of embodied socio-cultural knowledge, ethical responsibility, and contextual judgement that AI systems cannot replicate. The paper draws on conceptospheric research to demonstrate that the concept of DISASTER is a particularly demanding test case for AI translation capacity, revealing, in concentrated form, the general difficulties that culturally dense, emotionally weighted, and community-specific conceptual material poses for GenAI tools trained on monolingual, corpus-dominant data. The paper yields pedagogical implications for translator education programmes that aim to develop AI-literate professionals capable of both leveraging and critically evaluating GenAI tools across the full range of translation contexts.

**Keywords**: GenAI in translation; AI literacy; prompt engineering; human agency; suitability principle; hermeneutical competence; DISASTER concept; conceptosphere; translator education

**Introduction.** When ChatGPT became publicly available in November 2022, it put translation educators in an unfamiliar position. The arrival of statistical and neural machine translation had already reshaped debates about post-editing, quality assessment, and what translator competence actually means. However, generative AI felt different – and not only because it was more capable. It was conversational. It invited the user to negotiate, to push back, to refine. For the first time, the question was not simply what a machine could translate, but what happens to translation when the process itself becomes a dialogue between human and machine.

This paper is a response to that question – not a definitive one, but a synthesis of where the research currently stands. Drawing primarily on Penet, Moorkens and Yamada's edited collection Teaching Translation in the Age of Generative AI (2026), it looks across four teaching contexts: graduate-level general and literary translation, master 's-level computer-assisted language mediation, subtitling and audiovisual translation, and interpreter training [1]. These four domains span enough of the discipline to allow patterns to emerge – and patterns do emerge, consistently enough to suggest that the field is converging on a shared set of concerns.

Alongside this synthesis, the paper introduces a secondary thread drawn from the author's own research on the DISASTER concept. This is not a full conceptospheric analysis; it is an illustration – a way of making visible, through a particular kind of culturally dense material, what the current generation of AI tools struggles with and why that struggle matters.

**Purpose of the Work.** The aim here is threefold. The first is straightforward: to pull together the most significant findings from recent empirical work on GenAI in translator training and give educators a clear, evidence-grounded picture of what these tools can and cannot do in practice. The second is to identify principles that hold across different translation domains – guidelines that are specific enough to be useful but flexible enough to apply whether you are teaching legal translation, subtitling, or community interpreting. The third is to demonstrate that conceptually rich, culturally

specific material – of which disaster discourse is a compelling example – can serve as a diagnostic tool in AI literacy education, helping students recognise the difference between technically correct translation and translation that actually works.

Translator education programmes face a real tension at the moment. They need to prepare graduates who can use AI tools confidently, but also graduates who know when not to trust them. Navigating that tension requires more than general enthusiasm or general scepticism. It requires a careful understanding of where AI is genuinely helpful, where it is systematically unreliable, and why. That is what this paper tries to provide.

**Formulation of the Problem**. The core problem is this: there is a real risk that AI integration in translator education produces graduates who are fluent users of GenAI tools but poor evaluators of their output. This is not a hypothetical concern – it follows directly from how these tools work and how students tend to engage with them.

GenAI produces plausible text quickly. The translations it generates are often grammatically correct, semantically coherent, and stylistically reasonable. That surface plausibility is precisely the danger. The most significant failures of AI-generated translation are not the obvious mistakes – misspelt names, wrong numbers, garbled syntax – but what researchers across multiple studies have called suitability failures [2; 3; 4]: cases where the translation is technically acceptable but functionally wrong for the specific communicative context, audience, or purpose it is meant to serve.

Underlying this is what might be called the hermeneutical gap. Schleiermacher's (1813/1977) insight that translation is fundamentally an interpretive act – that it requires genuine understanding of a text's full cultural and situational meaning before that meaning can be rendered for a different reader – describes exactly what AI cannot do [5]. These systems learn from patterns in training data. They can reproduce the statistical regularities of high-frequency language use with impressive fidelity. What they cannot do is understand. One of the participants in Öner Bulut's (2026) study put it memorably: the AI knows everything about the world but has never actually seen it [2]. That asymmetry – vast textual knowledge with no embodied, contextual, or ethical grounding – is not a bug that will eventually be fixed. It is a structural feature of the technology.

There is also an emotional dimension to this problem that has received less attention than it deserves. Working with AI is not emotionally neutral. Participants in recent studies reported frustration when the tool failed to implement suggestions without repeated prompting, exhaustion when trying to elicit non-literal translation for figuratively complex material, and a kind of cognitive dissonance that comes from interacting with a system that sounds confident while being culturally oblivious. These experiences are not incidental; they shape how students engage with the technology and whether they develop the patience and critical distance to use it well. Current educator programmes largely leave students to manage this on their own [6].

The DISASTER concept sharpens all of these problems. Disaster is not a neutral technical category. Across different linguistic communities, the concept carries different configurations of causality and agency (Is a disaster an act of God? A failure of governance? A disruption of relational or cosmic order?), different levels of lexical granularity for distinguishing types and intensities of catastrophe, and different emotional and evidential conventions for how disaster knowledge is shared and attributed [7, 131]. AI systems trained predominantly on English-language corpora will encode the particular conceptual architecture of English-language disaster discourse and reproduce it in other languages, even when those languages have built entirely different conceptual structures around the same experiences. The result is not mistranslation in any narrow sense – it is conceptual displacement. Moreover, it is a concentrated instance of the suitability problem that recurs, in less visible forms, across every culturally demanding translation domain.

**Solving the Problem**. The research reviewed here converges on five principles that together point toward a coherent approach to AI-literate translator education.

*Suitability, not correctness, as the evaluative standard.* The most important shift GenAI integration demands from educators is also the simplest to state and the hardest to institutionalise: moving from correctness as the primary evaluation criterion to suitability. Inglada's (2026) AI

literacy framework is based on three fundamental principles – core translation skills, the ability to select and assess AI-generated options, and prompt engineering – but the thread running through all three is the same question: does this output actually do the job it needs to do? Not only is it grammatically incorrect, but does it serve the communicative purpose specified in the brief? Does it meet the expectations of the target audience? Does it carry the right emotional register? Does it preserve the pragmatic force of the source? These are questions AI cannot reliably ask of itself. They are the questions trained translators must ask – and training them to ask these questions should be at the centre of any AI-integrated curriculum [8].

*Deep training first, AI second.* One of the most consistent findings across the empirical literature is that prior professional training determines how productively – or dangerously – a translator uses AI tools. Participants in Öner Bulut's (2026) study said this plainly: you cannot prompt AI effectively without the same holistic competence that professional translator training develops [2]. You need to know what good translation looks like in order to recognise when AI has produced something that merely resembles it. This matters for curriculum design. The case for deep translation training before extensive AI integration is stronger now, not weaker. Better-trained translators are better prompt engineers, better evaluators of suitability, and better post-editors. AI integration should build on professional competence, not substitute for it.

*Human agency as the centre of the workflow.* Massey's (2021) concept of human added value gives theoretical substance to what many practitioners already sense: what trained translators bring to the work – embodied cultural knowledge, contextual judgement, ethical responsibility – is not the kind of thing that accumulates through exposure to training data. It develops through situated, socially grounded professional experience [9]. The pedagogical implication is that students should be positioned not as AI operators but as interpretive agents who deploy AI selectively, within workflows that remain fundamentally human in their evaluative and ethical dimensions. This is a different self-concept from that of a user who runs text through a tool and post-edits the output. It is the self-concept the profession needs.

*Taking the emotional labour seriously.* The emotional challenges of working with AI – frustration, exhaustion, dissonance – need to be recognised as a genuine pedagogical concern, not a side effect students should get used to. Programmes that explicitly address emotional intelligence, as Penet and Fernandez-Parra (2023) argue, will produce graduates better equipped for the realities of AI-assisted professional practice [6]. The gamification model developed by Othmani and Sharman (2026) for interpreter training offers a practical pathway: creating safe simulated environments where students can practise high-stakes decisions, make mistakes without professional consequences, and build the resilience and strategic flexibility that real AI collaboration requires [10].

*Ethics as a core component, not a supplement.* Moorkens and Doğru (2026) identify four clusters of concern that belong at the centre of any AI literacy curriculum: the governance of training data and the erasure of human creative labour in LLM development; algorithmic bias that follows from the overrepresentation of certain languages and worldviews in training corpora; the environmental costs of large-scale AI infrastructure; and the professional sustainability of deployment models that shift risk onto individual translators while reducing their rates [11]. Students who understand these dynamics are better equipped to make ethically informed decisions about when and how to use AI – and to participate in shaping the profession's response to the conditions under which these tools are being introduced.

**Conclusion**. The question for translator educators is no longer whether to integrate AI, but how. The world has largely made that decision outside the classroom. The question is what kind of professionals to produce in response, and the answer this paper argues for is: professionals who can use AI tools thoughtfully, evaluate their output rigorously, and understand both the value and the limits of what they are working with.

The five principles identified here – suitability over correctness, deep training as a prerequisite, human agency at the centre, emotional readiness as a pedagogical goal, and ethics as a core component – are not a formula. They are a set of commitments that need to be worked through

differently in different institutional and disciplinary contexts. However, they point in a consistent direction, and the empirical evidence behind them is substantial enough to take seriously.

The DISASTER concept earns its place in this argument not as a curiosity or a specialisation but as a test case that makes the general stakes visible. Disaster-related translation – emergency communications, humanitarian materials, community resilience resources – cannot afford to be merely technically correct. It needs to be conceptually adequate to the communities it is meant to reach. When AI systematically fails that test through conceptual displacement rather than surface error, it illustrates something that holds across all culturally demanding translation domains. AI tools are powerful amplifiers of professional competence. They are poor – and sometimes dangerous – substitutes for it. Educator programmes that build graduates who understand that distinction will have done the most important thing the current moment requires.

## References


1. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 49–64). Language Science Press.
2. Öner Bulut, S. (2026). Re-positioning the human translator as the future expert of GenAI translation in the translation classroom. In J. C. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 125–145). Language Science Press.
3. Vandepitte, S. (2026). AI in an L2 translation class. In J. C. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 191–210). Language Science Press.
4. Orrego-Carmona, D. (2026). Teaching subtitling in the times of generative AI. In J. C. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 167–190). Language Science Press.
5. Schleiermacher, F. (1813/1977). On the different methods of translating. In A. Lefevere (Ed.), Translating literature: The German tradition from Luther to Rosenzweig (pp. 66–89). Van Gorcum.
6. Penet, J. C., & Fernandez-Parra, M. (2023). Dealing with students' emotions: Exploring trait EI theory in translator education. The Interpreter and Translator Trainer, 17(3), 332–352.
7. Koliasa, O. (2025). The Role of historical context in shaping disaster discourse. *Аргументи сучасної філології:«Етика піклування»*, 2025.
8. Inglada, R. (2026). AI literacy: The concept of suitability and core translation skills. In J. C. Penet, J. C., Moorkens, J., & Yamada, M. (Eds.). (2026). Teaching translation in the age of generative AI. Language Science Press. https://doi.org/10.5281/zenodo.17580856
9. Massey, G. (2021). Translation literacy in additional language learning. Bulletin suisse de linguistique appliquée, 114, 31–45.
10. Othmani, S., & Sharman, N. (2026). Gamification as a pedagogical instrument in interpreter training. In J. C. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 211–231). Language Science Press.
11. Moorkens, J., & Doğru, G. (2026). Teaching AI ethics for translation students. In J. C. Penet, J. Moorkens, & M. Yamada (Eds.), Teaching translation in the age of generative AI (pp. 105–122). Language Science Press.

# DIGITALIZATION OF PROFESSIONAL TRAINING OF FUTURE VOCATIONAL EDUCATION TEACHERS IN THE CONDITIONS OF EDUCATIONAL TRANSFORMATIONS

**Kovalchuk V.[1], Kovalchuk A.[2], Tkachenko N.[2], Horbatiuk R.[3], Mykhailov V.[1]**
[1]Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Zaporizhzhia, Ukraine
[2]Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Hlukhiv, Ukraine
[3]Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University, Ternopil, Ukraine

**Abstract**. The paper examines the digitalization of professional training of future vocational education teachers in the context of educational transformations caused by the development of the digital society, artificial intelligence, and Industry 4.0. The study substantiates the methodological foundations and structural components of digitalization and identifies the current state of implementation of digital technologies in higher education institutions. The empirical study involving students and academic staff revealed that digital tools are actively used in the educational process; however, the implementation of advanced technologies remains insufficient. The necessity of systematic modernization of vocational and pedagogical education and the development of digital competence of future teachers is emphasized.

**Keywords**: digitalization of education; professional training; future vocational education teachers; digital competence; digital transformation.

**Introduction**. The digital transformation of society significantly influences the development of modern education and changes approaches to the professional training of specialists. Rapid advances in artificial intelligence, automation, digital communication technologies, and online learning platforms require the modernization of educational systems and the preparation of teachers capable of effective professional activity in digitally transformed environments.

These transformations are especially relevant for vocational and pedagogical education, as future vocational education teachers must not only master digital tools themselves but also prepare students for professions that are rapidly changing under the influence of technological innovations. International analytical reports emphasize that digital technologies have become a strategic factor in ensuring accessibility, flexibility, and quality of education [1; 2].

At the same time, the implementation of digital technologies in vocational and pedagogical education remains uneven and often limited to basic digital tools. This determines the need for scientific understanding of the methodological foundations, structural components, and practical implementation of digitalization in the professional training of future vocational education teachers.

**Problem Statement**. The current system of professional training of future vocational education teachers does not always correspond to the rapid pace of technological development and the requirements of the digital labor market. Educational programs often preserve traditional approaches to teaching, while digital technologies are integrated fragmentarily rather than systematically.

Another important issue is the insufficient readiness of future teachers to use artificial intelligence technologies, virtual simulators, adaptive educational systems, and digital assessment tools in professional activities. In addition, higher education institutions face several barriers to digital transformation, including limited material and technical resources, insufficient methodological support, and the need to improve the digital competence of teachers.

These contradictions highlight the necessity of developing a holistic approach to the digitalization of vocational and pedagogical education and updating the content and methods of professional training.

**The purpose of the paper** is to substantiate the essence, methodological foundations, and structural components of the digitalization of professional training of future vocational education teachers and to identify the current state, key challenges, and prospects of implementing digital technologies in vocational and pedagogical education.

**Solving the problem**. Digitalization is understood as the integration of digital technologies into all spheres of human activity, including education [3]. In vocational and pedagogical education,

digitalization involves not only the use of digital tools but also the transformation of educational content, teaching methods, forms of interaction, and approaches to educational management. These innovations expand access to academic resources, enable personalized learning trajectories, and foster the development of flexible, mobile, and adaptive educational environments. The comprehensive integration of digital technologies into educational, research, organizational, and managerial activities constitutes the foundation of institutional digital transformation, enhancing the effectiveness of the educational process and ensuring alignment with the demands of the digital society [4, p. 195].

The digitalization of professional training is based on several methodological approaches, including systemic, competency-based, technological, informational, interdisciplinary, STEM-oriented, and personal and activity-based approaches [5-11]. Their integration ensures the formation of digital competence, innovative thinking, professional mobility, and readiness for professional activity in digitally transformed educational environments.

In a broad sense, the digitalization of professional training of future vocational education teachers can be defined as a socio-educational process of transforming vocational and pedagogical education under the influence of digital technologies.

In a narrow sense, the digitalization of professional training refers to a set of pedagogically and technologically grounded actions aimed at integrating digital tools, platforms, and methods into the educational process in order to develop digital competencies in future vocational education teachers [12, p. 54].

The main structural components of digitalization include:

– infrastructural component, which ensures the development of digital educational infrastructure;
– methodological component, focused on updating teaching methods and technologies;
– competency-based component, aimed at developing professional and digital competencies;
– organizational component, related to the management of digital transformation processes;
– value-cultural component, which promotes digital ethics, academic integrity, and responsible use of technologies.

To assess the current state of digitalization, an empirical study was conducted among students (n = 120) and academic staff (n = 35) at Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University and Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University.

The findings revealed that digital technologies are actively used in the educational process, primarily learning management systems, videoconferencing platforms, electronic presentations, and digital assessment tools. However, the implementation of innovative technologies, such as artificial intelligence tools, adaptive learning systems, and virtual simulators, remains limited.

The study also identified the main barriers to digital transformation, including insufficient material and technical support, limited methodological resources, a lack of practical experience with advanced digital technologies, and insufficient digital competence among some teachers.

The obtained results indicate that the digitalization of professional training of future vocational education teachers remains predominantly instrumental and requires a more systematic and practice-oriented approach.

**Conclusion**. The study confirms that the digitalization of professional training of future vocational education teachers is a strategically important direction of modernization of vocational and pedagogical education in the conditions of digital transformation of society.

Effective digitalization requires systematic renewal of educational content, wider implementation of innovative digital technologies, integration of artificial intelligence into the educational process, and continuous professional development of academic staff. The findings also emphasize the necessity of creating organizational and pedagogical conditions that ensure the effective formation of digital competence and readiness of future teachers for professional activity in digitally transformed educational environments.

## References


1. UNESCO. (n.d.). *AI and technologies in education: Championing educational equity with technologies*. https://www.unesco.org/en/digital-education?hub=66704
2. OECD. (2025). *Trends shaping education 2025*. https://www.oecd.org/en/publications/trends-shaping-education-2025_ee6587fd-en/full-report/global-trends-and-the-future-of-education-in-2025_7358e77a.html
3. Ukrainian Institute for the Future. (n.d.). *Ukraine 2030E – A country with a developed digital economy*. https://strategy.uifuture.org/kraina-z-rozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html#6-2-1 (in Ukrainian)
4. Kovalchuk, V., Kovalchuk, A., Vovk, B., Derevyanchuk, O., & Rozhkov, O. (2025). Model of digitalization of professional training of future vocational education teachers. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference, 3*, 195–201. https://doi.org/10.17770/etr2025vol3.8560
5. Hurzhii, A., Radkevych, V., & Pryhodii, M. (2022). Methodological principles of digitalization of the information and educational environment of vocational education institutions. *New Learning Technologies, 96*, 44–53. https://doi.org/10.52256/2710-3560.2022.96.06 (in Ukrainian)
6. Bobro, N. (2024). Digitalization of education: Challenges and opportunities in the XXI century. *Young Scientist, 5*(129), 46–50. https://doi.org/10.32839/2304-5809/2024-5-129-8 (in Ukrainian)
7. Lavrentieva, O. O. (2022). Formation of professional digital competence of students of engineering and pedagogical specialties in the agricultural profile under conditions of innovative development of higher education institutions. *Scientific Notes of Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Pedagogy, 1*(2), 6–14. https://doi.org/10.25128/2415-3605.22.2.1 (in Ukrainian)
8. Kapranov, Y. V., & Semenog, O. M. (2024). Principles of digitalization in philological education at higher education institutions in Poland and Ukraine. In *Philology and philological education in the digital transformation era: European dimensions, national context, intercultural communication* (pp. 33–90). Baltija Publishing. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-456-6-3
9. Bosko, N. (2022). The role of ICT in implementing the interdisciplinary STEM approach in education under conditions of sustainable social development. In S. Dovhyi (Ed.), *Information and communication technologies and sustainable development* (pp. 227–230). https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-12-06_UDK_book_Monografia_48x210.pdf (in Ukrainian)
10. Derevyanchuk, O., Kovalchuk, V., Balovsyak, S., Dominikov, M., Kravchenko, H., Pshenychnyi, O., & Kovalchuk, A. (2025). Implementation of the STEM project "Modeling of spatial images of polyhedra" in the professional training of future specialists in engineering and pedagogical specialties. In Z. Hu, F. Yanovsky, I. Dychka, & M. He (Eds.), *Advances in computer science for engineering and education VII. ICCSEEA 2024* (Vol. 242, pp. 683–692). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84228-3_59
11. Derevyanchuk, O. V., Kovalchuk, V. I., Kramar, V. M., Kravchenko, H. O., Kondryuk, D. V., Kovalchuk, A. V., & Onufriichuk, B. V. (2024). Implementation of STEM education in the process of training future specialists in engineering and pedagogical specialties. *Proceedings of SPIE, 12938*, 214–217. https://doi.org/10.1117/12.3012996
12. Kovalchuk, A. V. (2025). *Organizational and pedagogical conditions of digitalization of professional training of future vocational education teachers* (Doctoral dissertation, Hlukhiv Oleksandr Dovzhenko National Pedagogical University) (in Ukrainian)

# A SPIRAL MODEL FOR THE CONCEPTUAL GROUNDING OF SET MEASURE THROUGH DIGITAL TOOLS IN DEVELOPING UNDERGRADUATE AND GRADUATE MATHEMATICS STUDENTS' PROFESSIONAL CULTURE

**Kovtoniuk M., Bak S., Soia O., Kosovets O.**
Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine

**Abstract.** This paper examines the role of the conceptual grounding of mathematical concepts in developing the professional culture of undergraduate and graduate mathematics students in the context of educational digitalization. The study focuses on the professional training of future mathematicians, with attention to the didactic potential of grounding the concept of set measure. The purpose of the study is to provide a theoretical and methodological substantiation for the conceptual grounding of set measure as a means of developing the professional culture of undergraduate and graduate mathematics students, with emphasis on designing a spiral model for this concept, identifying its didactic potential in mathematics education, enhancing students' ability to model and solve professionally oriented problems, and exploring the use of digital technologies and project-based learning to deepen their conceptual understanding of set measure. The study employed theoretical analysis and synthesis of scholarly sources, modeling, educational content design, pedagogical observation, and questionnaire surveying. The results substantiate a five-level spiral model for the concept of set measure and present a software tool for calculating the Jordan measure of arbitrary images. It is demonstrated that combining visualization, approximate computation, and mathematical interpretation deepens students' understanding of measure, develops abstract thinking, and contributes to their professional culture.

**Keywords:** Professional Culture of Undergraduate and Graduate Mathematics Students, Conceptual Grounding, Spiral Model, Jordan Measure of a Set, Digital Technologies, Project-Based Learning.

**Introduction.** Modern higher mathematics education requires not only the acquisition of procedural skills but also the development of a professional culture among undergraduate and graduate mathematics students [1]. In this context, the principle of conceptual grounding assumes importance [2–3], as it makes possible the organization of mathematical knowledge as an integral and spirally structured system through identifying hierarchical and functional relationships among mathematical objects. The concept of measure is an illustrative case for revealing the heuristic potential of conceptual grounding. The theoretical substantiation of the potential of conceptual grounding of set measure makes it possible not only to optimize learning of mathematical analysis and measure theory, but also to conceptualize this process as an effective instrument of students' professional development in the educational environment.

**The purpose of the work** is to provide a theoretical and methodological substantiation for the conceptual grounding of set measure as a means of developing the professional culture of undergraduate and graduate mathematics students, with particular emphasis on designing a spiral model for this concept, identifying its didactic potential in mathematics education, enhancing students' ability to model and solve professionally oriented problems, and exploring the use of digital technologies and project-based learning to deepen their conceptual understanding of set measure.

**Formulation of the problem.** The formation of set measure is a complex process, as it involves a transition from intuitive notions of length, area, and volume to rigorous definitions of Jordan and Lebesgue measures. Traditional instruction does not always ensure continuity between these levels, creating a need for a didactic model capable of providing gradual conceptual deepening, visualization of abstract objects, and students' engagement in mathematical activity. In this regard, theoretical and methodological substantiation of the mechanism of conceptual grounding of set measure is required as a tool for aligning the cognitive and professional components of training undergraduate and graduate mathematics students. Such an approach makes it possible to view learning not only as the acquisition of mathematical content, but also as the development of capacity for professionally relevant mathematical activity, which constitutes the essence of the professional culture of specialists.

**Solving the problem.** To address the problem, a five-level spiral model for the conceptual grounding of the concept of set measure for undergraduate and graduate mathematics students was

developed on the basis of the educational and professional programmes in Specialty E7 Mathematics at the first (bachelor's) [4] and second (master's) [5] degrees of higher education (Fig. 1). At the first level, students rely on school-level geometric intuitions. The second and third levels involve the study of Jordan and Lebesgue measures in the courses of mathematical and functional analysis. The fourth level is associated with methodological reflection on teaching this concept. The fifth level encompasses mathematical and computer-based modeling of real-world processes.

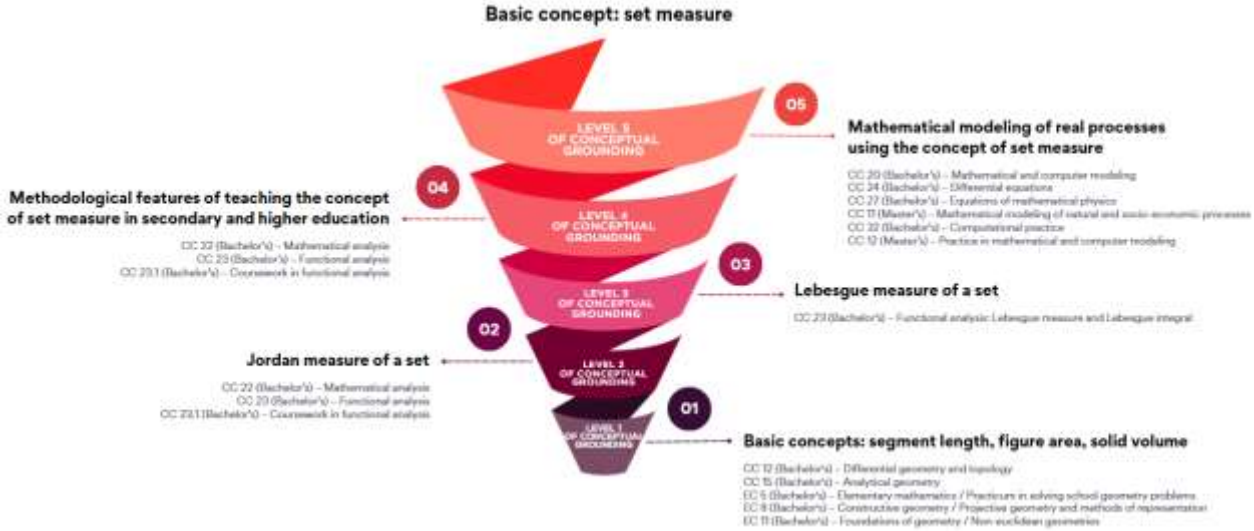



Fig. 1. Spiral model for the conceptual grounding of set measure (CC – Compulsory Component, EC – Elective Component) (author's development)

An important component of this approach is the use of digital technologies. The modeling of the concept of set measure can be effectively implemented on the basis of the architecture of digital technologies in the teacher's educational environment and through the use of the so-called wheel of digital technologies [1]. The Python program developed by the authors implements the classical grid method and makes it possible to calculate the inner and outer Jordan measures of arbitrary planar images, visualize the refinement of partitions, and trace the convergence of approximations. The software tool is built around a single main class, JordanMeasureCalculator, which encapsulates the entire logic of computation and data storage. This architecture ensures modularity and facilitates further functional extension. A distinctive feature of the approach lies in the fact that the class stores the complete history of computations in the results_history list, which makes it possible not only to obtain the final result but also to analyze the convergence dynamics of the Jordan method. The following key fragment illustrates this architecture.

```
class JordanMeasureCalculator:
    def __init__(self, image_path):
        self.image_path = image_path
        self.binary_image = None
        self.original_image = None
        self.image_array = None
        self.height = 0
        self.width = 0
        self.threshold = 128
        self.results_history = []
```

Each instance of the class independently stores all intermediate results, enabling parallel computations for different images without data loss. This is particularly important for educational purposes, as it allows students to compare the results obtained for different figures.

The process of determining the measure (area) of a set $E$ is shown in Fig. 2.

In didactic terms, project-based tasks contribute to the preparation of qualified mathematics students capable of creative thinking, problem analysis, and effective performance in non-standard

situations. They foster professional culture, theoretical reasoning, accurate mathematical expression, justified problem solving, and the ability to analyze, synthesize, classify, identify essential information, and interpret results. They also develop students' capacity to work with abstract concepts under conditions of uncertainty and multiple possible solutions.

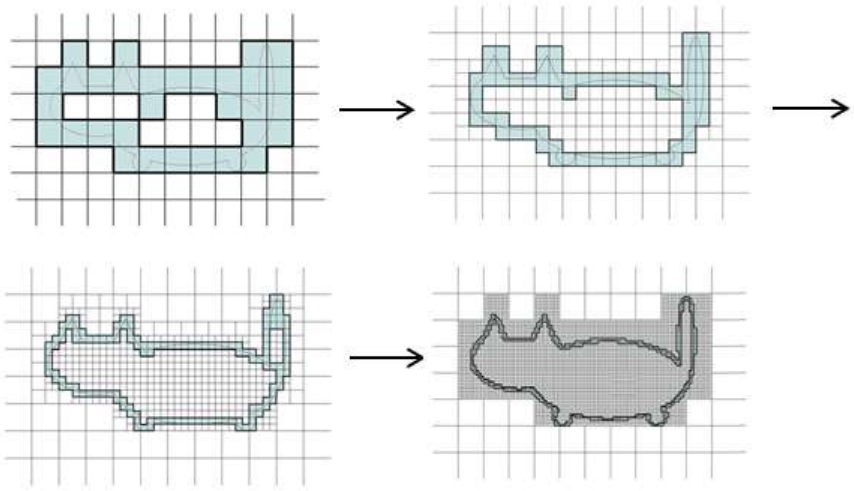


Fig. 2. Variation in the difference between $S_k(E)$ and $s_k(E)$ for the set $E$, where $S_k(E)$ is the sum of the areas of the squares that contain or intersect $E$, and $s_k(E)$ is the sum of the areas of the squares entirely contained within the set $E$

A study conducted among students enrolled in the E7 Mathematics program at Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University confirmed the value of this approac0068: all respondents noted that as the partition step decreases, the inner measure increases, the outer measure decreases, and the difference between them narrows. Although direct computation was identified as the most challenging stage, satisfaction with the project remained high. These findings support the view that the project is an innovative tool for developing students' conceptual understanding of the measure of a set by combining visualization, approximate computation, and mathematical interpretation, while fostering logical thinking and accurate interpretation of mathematical results.

**Conclusion.** The study demonstrates that the conceptual grounding of set measure is an effective means of developing the professional culture of undergraduate and graduate mathematics students. The proposed spiral model ensures continuity among the intuitive, theoretical, methodological, and applied levels of mathematical training. The integration of digital technologies, visualization, and project-based learning deepens students' understanding of the Jordan measure, promotes the development of mathematical thinking, reasoned argumentation, the ability to work with abstract objects, and the interpretation of results in terms of measure theory.

**References**


1. Kovtoniuk, M., Soia, O.: Peculiarities of Formation of Professional Culture of Mathematics Teacher. Mathematics, Informatics, Physics: Science and Education, 1(2), pp. 183-199, (2024), doi:
2. Baez, R., Sanchez, H., Pllana, D.: Fostering Rigor through Spiraled Mathematics Education. International Journal of Research in Education and Science. 11, pp. 922-943, (2025).
3. Lukashova, T., Drushlyak, M., Khvorostina, Y.: Knowledge foundation in the system of professional training of pre-service mathematics teachers in studying the mathematical induction method. Physical and Mathematical Education, 38(3), pp. 29-35, (2023).
4. Kovtoniuk, M. M., Bak, S. M., Kovtoniuk, H. M., Tiutiun, L. A., Semenets, D. A., Didusenko, A. V., Kukhta, I. I. Educational-professional program "Computer Mathematics" (Bachelor's degree, specialty E7 Mathematics), Vinnytsia, VSPU, 22 p., (2025).
5. Bak, S. M., Kovtoniuk, M. M., Tiutiun, L. A., Semenets, D. A., Larkin, O. V., Didusenko, A. V. Educational-professional program "Mathematics. Mathematical Modeling" (Master's degree, specialty E7 Mathematics), Vinnytsia, VSPU, 19 p., (2025).

# METHODOLOGY FOR THE FLIPPED USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES TO ENSURE STUDENTS' CONTINUOUS LEARNING UNDER WARTIME CONDITIONS

**Kozubtsova L.[1], Lishchyna V.[2], Kozubtsov I.[2], Beskrovnyi O.[1], Mamonova O.[3]**
[1]Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine
[2]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[3]Donetsk State University of Internal Affairs, Kropynytskyi, Ukraine

**Abstract**. Following an analysis of recent studies and publications, the authors identified an insufficiently researched aspect of the problem. The essence of the problem lies in the need to minimise the impact of the technical reliability of e-learning systems, as the vast majority of academic publications have focused on the advantages and disadvantages of webinars in facilitating learners' participation in non-formal education for professional development. However, the issue of ensuring the continuity of students' education under wartime conditions remains largely overlooked. The aim of this study is to test a methodology for the flipped use of information technologies to ensure continuous learning for students in a war zone. To achieve this aim, a range of research methods was employed, including theoretical analysis and synthesis of the academic literature related to the topic, as well as synthesis for the formulation of conclusions and recommendations aimed at improving effectiveness. The final outcome of the study was the development and testing of a methodology for the flipped use of information technologies to ensure the continuity of students' learning under wartime conditions.

**Keywords**: Webinar, Professional Development, Non-formal Education, Researcher, War, Technical Reliability.

**Introduction**. With the outbreak of the COVID-19 pandemic, the planned processes of educational and research institutions in Ukraine and most countries of the world were partially suspended, as it turned out, due to their unpreparedness to function in force majeure circumstances. The problem worsened with the outbreak of full-scale hostilities. However, even in the midst of hostilities, the educational process and work activities cannot be suspended indefinitely. That is why clear criteria are needed for the transition of students' studies and employees' work to a remote format. Experience has shown that higher education institutions (HEIs) are in a better position than research institutions. Many higher education institutions started using distance communication and learning technologies much earlier than research institutions. However, other problems have arisen in higher education institutions, namely the psychological unpreparedness of students to use technologies that involve the partial absence of a teacher, namely independent study of educational material. Often, limited technical capabilities lead to delays in the transmission of sound, video and graphics, and access to the Internet is still difficult in some rural areas. Given the frequency of the complex problem in force majeure circumstances, great expectations are placed on their successful solution through the use of webinar technology, not only for the educational process of higher education institutions, but also for the professional development of researchers in the context of epidemics and war.

**The purpose of the work**. The aim of this study is to test a methodology for the flipped use of information technologies to support students' continuous learning under wartime conditions.

**Formulation of the problem**. The analysis of recent research and publications allowed us to identify an unexplored aspect, namely, the problem of minimising the impact of the technical reliability factor of the 'black box' telecommunications component, since the vast majority of scientific publications considered the advantages and disadvantages of using a webinar in terms of the comfort of students' participation in non-formal education for professional development.

**Solving the problem**. There are often cases when a computer suddenly fails without warning [1]. Therefore, the issue of assessing and ensuring the technical reliability of digital communication channels intensified when the 2021 forecast of the consequences of a telecommunications collapse was put into practice on 12 December 2023, and Kyivstar's network was out of service for several days.

Based on the above experience, the study [2] recommends applying the condition of checking the prospective directions of the Ukrainian education system development for the adequacy of the educational process to the requirements of ensuring technical reliability.

How can the continuity of the educational process for advanced training or training of students be realised in the face of possible violation of the technical reliability of information and telecommunication technologies? To do this, it is necessary to introduce a comprehensive methodology for using webinars and flipped classroom technology.

Under war conditions, not only is the quality of the lecture of key importance, but also the lecturer has to focus on creating safe conditions for students to stay in educational institutions. It should be noted that as a result of the unpredictability of air raids, there is also a forced reduction in classroom time. Undoubtedly, this creates conditions for disrupting the traditional logic of the educational process. However, due to the introduction of blended learning, which combines traditional technologies with distance learning, this has given good results.

To ensure balance under such conditions, it is rational to apply blended learning in higher education institutions in the pedagogical technology of the 'method of advanced learning' [3], which is modernised as the technology of the 'flipped' classroom, the essence of which is to rearrange the key components of the educational process [4]. The 'flipped' learning process is implemented in the form of successive stages: pre-classroom - classroom - post-classroom work, with pre-classroom and post-classroom work implemented in a digital educational and scientific environment. Pre-classroom work is independent work in the digital educational and scientific environment that continues during the classroom work. The transition to the digital educational and scientific environment occurs again at the stage of post-class work to consolidate the material (Fig. 1).

Blended learning is a model built on the basis of integration and mutual complementation of traditional and e-learning technologies, which involves reducing classroom lessons by transferring certain types of learning activities to the digital educational and scientific environment.

Transferring a part of the course to the format of independent distance learning allows to minimise the lecturer's working hours and creates an environment for the implementation of an individual learning trajectory for each student by providing the opportunity to complete a part of the course online at a convenient time. For each shortened lesson, the learning activities are redistributed between pre-class, classroom and post-class work. In the new scheme, the central place is occupied by classroom lessons, around which pre- and post-classroom work is built (Fig. 1).

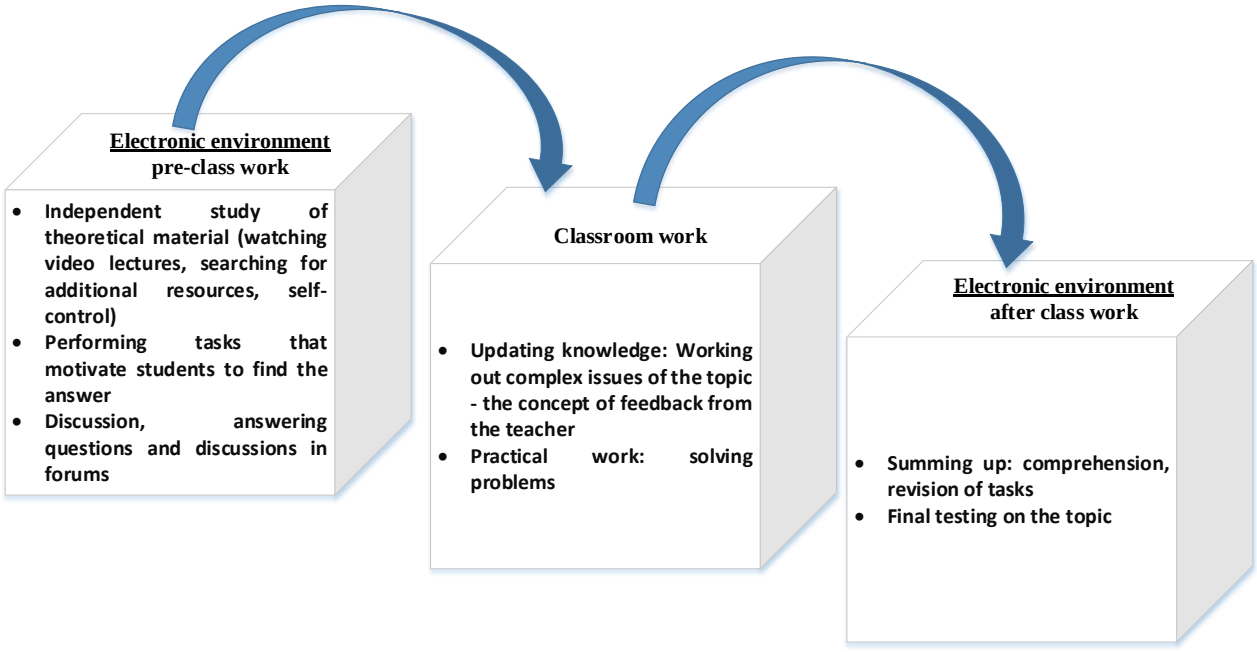



Fig. 1. The flipped learning process

The expected effect of introducing blended learning is based on the results of E. Dale's research on the relationship between the quality of the material learned during the study course and the forms of its teaching [5]. So, we hope to be able to provide: up to 20% of mastering the lecture material in extracurricular time (students' success depends on the time spent on extracurricular activities [6]; during classroom time through visuals (figures, tables, etc.) and organising it for students in the form of participation in a discussion up to 70%. Teachers prefer online lectures and practical classes in the classroom. The common agreement on the desire for interpersonal contact between students and teachers still needs to be objectively assessed. The same applies to the students' adherence to academic integrity. The lack of personal supervision by the teacher has led to a violation of academic integrity when students copy answers from the Internet or their top-rated peers [7]. Nevertheless, a reasonable balance of the combination of virtual and real educational work in the practice of training students will contribute to the development of the modern intellectual potential of the state – people even in war and post-war times as a factor of socio-economic and innovative progress [8]. The proposed methodology does not contradict the previously known statement about assistive technologies in improving the teaching and learning of certain disciplines [9], so it can be supplemented with other pedagogical technologies.

**Conclusion**. Thus, conducting training in a distance format using webinar technology is associated with a number of advantages and disadvantages from the point of view of the teacher (lecturer) and the student. Most of the difficulties in such training are related to motivation, coordination and control of learning activities. The aspect of ensuring the technical reliability of the lecturer-student branch of the digital communication channel of the webinar deserves a separate study. This result expands the scientific boundaries of the philosophy of education and the theory and methodology of vocational education, supplementing the knowledge about the possibility of ensuring the continuity of the educational process in the current conditions of hybrid warfare and the possibilities of technological progress. The possible implementation of a comprehensive methodology for using webinars and flipped classroom pedagogical technology should not be difficult. The final effect should be the continuity of the educational process.

## References


1. Simpson, T., Danso, J., Addor, J. A., Anaman, S. G.: Survival Analysis of Computers at a University's Computer Laboratory and Implication on Maintainability. *International Journal of Education and Management Engineering*, Volume 14, No. 2. pp. 17–28, (2024). DOI:10.5815/ijeme.2024.02.02.
2. Kozubtsov, I.M., Tulashvili, Yu.Y., Zdolbitska, N.V.: Umova perevirky perspektyvnykh napriamkiv rozvytku systemy osvity Ukrainy na adekvatnist realizatsii osvitnoho protsesu vymoham zabezpechennia tekhnichnoi nadiinosti. *Systemy i tekhnolohii zviazku, informatyzatsii ta kiberbezpeky: aktualni pytannia i tendentsii rozvytku*: materialy III Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, pp. 346–347. Viiskovyi instytut telekomunikatsii ta informatyzatsii imeni Heroiv Krut, (2023).
3. Lysenkova, S.M.: The method of anticipatory learning: a book for teachers: from work experience. Enlightenment, (1988).
4. Bergmann, J., Sams, A.: Flip your classroom: reach every student in every class every day. Washington, DC: International Society for Technology in Education. (2012).
5. Dale, E.: Audio-Visual Methods in Teaching. 3rd ed. New York: Holt, Rinehart & Winston, (1969).
6. Sharma, N., Appukutti, Sh., Garg, U., Mukherjee, J., Mishra, S.: Analysis of Student's Academic Performance based on their Time Spent on Extra-Curricular Activities using Machine Learning Techniques. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, Volume 15, No.1, pp. 46–57. (2023).
7. Das, B., Debnath, R., Khatua, D.: Online Framework of Examination for Evaluating Learner's Knowledge. *International Journal of Education and Management Engineering*, Volume 14, No. 6: 58–67, (2024). DOI:10.5815/ijeme.2024.06.05.
8. Hajirahimova, M.Sh., Ismayilova, M.I.: Assessment Methodology of Intellectual Potentia. *International Journal of Education and Management Engineering*, Volume 14, No. 1, pp. 16–24, (2024). DOI:10.5815/ijeme.2024.01.02.
9. Adebayo, E.O., Ayorinde, I.T.: Efficacy of Assistive Technology for Improved Teaching and Learning in Computer Science. *International Journal of Education and Management Engineering*, Volume 12, No. 5, pp. 9–17. (2022).

# FOSTERING STUDENTS' CREATIVE PROBLEM-SOLVING SKILLS USING MACHINE LEARNING AND DRONES

**Movchan M.[1], Strutynska O.[1,2], Romero M.[2,3]**
[1]Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine
[2]Université Côte d'Azur, Nice, France
[3]Artificial Intelligence Research Institute, Spanish National Research Council (IIIA-CSIC), Barcelona, Spain

**Abstract.** This study explores fostering students' creative problem-solving (CPS) skills using machine learning (ML) and drones within real-world scenarios. As artificial intelligence (AI) has a huge impact on industries, CPS is highlighted by the World Economic Forum as a critical future skill. Forty-seven students (international and Ukrainian) engaged in team-based challenges, working ML models via tools like Google's Teachable Machine and simulating drone applications for complex issues, including war-related contexts. Students effectively integrated diverse AI solutions, demonstrating innovative applications in tasks such as a simulated animal rescue during the 2023 Kakhovka Dam disaster in Ukraine. Despite initial inexperience, they found the approach rewarding, enhancing their understanding of AI's capabilities and limitations, and highlighting the value of interactive, problem-based learning for AI literacy and real-world application, especially in crisis situations.

**Keywords:** Creative problem-solving skills, Machine learning, Drones, Real-world problem-solving.

**Introduction.** As AI transforms industries and reshapes the nature of work, creative problem-solving (CPS) remains one of the most valuable and uniquely human capabilities. Recent World Economic Forum reports highlight creativity and problem-solving as among the top skills for the future workforce.

Many researchers are studying the impact of AI on creative thinking and creative problem-solving skills. Habib et al. [1] note that while AI has the potential to significantly support creative thinking, it also negatively impacts creativity and creative confidence. The findings of Promma et al. [2] reveal that AI literacy plays a crucial mediating role in the development of CPS.

Integrating CPS into the educational process can increase students' motivation to learn. To implement such an approach, assignments need to be developed to foster CPS skills in real-world scenarios. The tools for said assignments can include modern technologies, such as ML and drones, which will enhance task immersion and provide students with valuable practical skills.

**The purpose of the work** is to showcase the use of ML tools and drones to solve real-world problems.

**Formulation of the problem.** To explore AI's application in real-world problem-solving (RWPS), we designed and implemented practical assignments for students using machine learning (ML) and drones. These tasks included real-world scenarios related to the war in Ukraine to promote interaction and practical understanding of the possibilities of using AI for RWPS.

**Solving the problem.** The study involved 47 students (35 international and 12 Ukrainian students) who worked in teams to tackle challenges using appropriate AI tools. Empirical methods (observation, survey) were used in the research process. The level of students' engagement in using AI tools for creative RWPS was assessed based on an analysis of their proposed solutions and their presentations.

The study of the possibilities of using AI tools to solve real-world problems consisted of several stages:

1. Introducing students to ML tools and teaching them how to train appropriate ML models.
2. Demonstrating to students how drones with a built-in camera (for object recognition) work.
3. Offering training tasks with real-world scenarios, in the process of which the use of a drone with ML models loaded into its memory is simulated.

For the activities mentioned above, the required items are a drone (e.g., DJI Tello), a drone control app, and a training ML model tool. To make ML more accessible to all students, we used *Teachable Machine with Google* as a service for training the object detection model.

Using the pre-made app to control the drone, students are able to integrate the pre-trained ML model into their app and start solving tasks with it. Below is an example of one of the real-life scenario offered to students.

The RWPS scenario prompts the students to imagine themselves in the aftermath of the 2023 Kakhovka Dam disaster in the Kherson region of Ukraine. We tasked the students with emulating the mission of a drone operator, whose task was to identify and rescue animals in flooded areas. The analysis of students' activity during this mission demonstrated their ability to integrate proposed AI solutions, including infrared cameras for heat signature analysis, computer vision for object detection, and machine learning tools for audio and visual recognition of animal sounds.

Overall, most students were generally positive about the idea of using AI tools for RWPS. Such an experience will allow students to develop their creative and critical thinking skills in response to modern challenges associated with the rapid development of technology.

**Conclusion.** Despite initial inexperience in working with ML tools and drones, students found this approach to fostering RWPS quite rewarding and effective. Teamwork and collaborative creativity using AI tools allowed all students to successfully complete the tasks and propose original ideas.

The study revealed that problem-based tasks involving real-life issues significantly enhance students' understanding of AI's capabilities and limitations. These assignments cultivated engagement and showcased the effective application of AI in various real-world scenarios. The research aligns with findings by Boussioux et al. [3] that AI-human collaboration can lead to solutions of higher quality and strategic value. It also supports the notion that interactive learning, as suggested by Sintov et al. [4], deepens comprehension and equips learners with AI literacy and the capacity to integrate AI not only in educational settings but also to consider it for RWPS in crisis situations such as the 2023 Kakhovka Dam disaster or the Valencia floods (2024), which are part of the increasing number of natural disasters worldwide.

## References


1. Habib, S., Vogel, T., Anli, X., & Thorne, E. (2024). How does generative artificial intelligence impact student creativity? Journal of Creativity, 34(1), 100072. https://doi.org/10.1016/j.yjoc.2023.100072
2. Promma, W., Imjai, N., Usman, B., & Aujirapongpan, S. (2025). The influence of AI literacy on complex problem-solving skills through systematic thinking skills and intuition thinking skills: An empirical study in Thai gen Z accounting students. Computers and Education: Artificial Intelligence, 8, 100382. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100382
3. Boussioux L., Lane J.N., Zhang M., Jacimovic V., Lakhani K.R. (2024). The Crowdless Future? Generative AI and Creative Problem-Solving. Organization Science, 35(5).
4. Sintov, N., Kar, D., Nguyen, T., Fang, F., Hoffman, K., Lyet, A., & Tambe, M. (2017). Keeping it Real: Using Real-World Problems to Teach AI to Diverse Audiences. AI Magazine, 38(2), 35-47.

# USE OF DIGITAL RESOURCES AS A CONDITION FOR IMPROVING THE TEACHING OF PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL DISCIPLINES IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**Petrenko L.[1], Artiushyna M.[2], Kulalaieva N.[2], Trynus O.[1], Marshytska V.[1]**
[1]Ivan Ziaziun Institute of Pedagogical Education and Adult Education of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The authors analyzed the impact of teachers' frequency of engagement with digital resources on improving the teaching of psychological and pedagogical disciplines in higher education institutions. The study assessed the level of teachers' engagement with digital resources, established a link between pedagogical experience and the frequency of using digital teaching tools, and substantiated optimization strategies based on a survey with a structured questionnaire. Most respondents actively use digital resources in teaching these disciplines, indicating high professional readiness for enhancing the educational process amid digitalization. A high level of active engagement with digital tools is characteristic of both young and experienced teachers, confirming positive dynamics in developing teaching staff's digital competence and readiness for further professional growth. Meanwhile, a small proportion of teachers with low usage levels stems from discipline-specific challenges, large student groups, or limited preparation for digital innovations, underscoring the need for systemic measures such as regular training, administrative support, and continuous professional development.

**Keywords**: lecturer, higher education institution, professional development, engagement with digital resources, student-centered learning, digital competence

**Introduction.** The gap between lecturers' level of digital competence and the quality of specialist training amid contemporary challenges represents one of the key issues in modern higher education [1–5]. Despite the widespread adoption of digital resources in higher education institutions in recent years (online platforms, interactive tools, assessment systems, virtual simulations, AI), the impact of lecturers' engagement with digital resources on improving the teaching of psychological and pedagogical disciplines remains insufficiently studied.

This necessitates addressing the research problem, which involves establishing a clear relationship between lecturers' engagement with digital resources and the effectiveness of enhancing the teaching of psychological and pedagogical disciplines in higher education institutions. The problem's relevance is underscored by the fact that digital tools serve as a powerful resource for fostering an active cognitive stance among students; however, their potential in university education is not fully realized, i.e., not applied systematically [6–7].

**The purpose of this study is** to analyze the impact of lecturers' engagement with digital resources in higher education institutions on improving the teaching of psychological and pedagogical disciplines.

**Formulation of the problem**. In line with the study's purpose, the following objectives were addressed: to assess the level of lecturers' engagement with digital resources; to establish the relationship between lecturers' pedagogical experience and the extent of using digital teaching tools in psychological and pedagogical disciplines; and to substantiate strategies for optimizing the use of digital tools in teaching these disciplines at higher education institutions.

**Solving the problem**. To assess lecturers' engagement with digital resources, responses to questionnaire items were analyzed using a 5-point Likert scale (Fig. 1).

It was found that 68.1% of respondents rated their use of digital resources in teaching at 5 points, and 27.5% at 4 points, totaling 95.6% high scores. Thus, 95.6% of lecturers demonstrate a high level of engagement with digital teaching tools, indicating significant interest and active application of digital tools in teaching psychological and pedagogical disciplines.

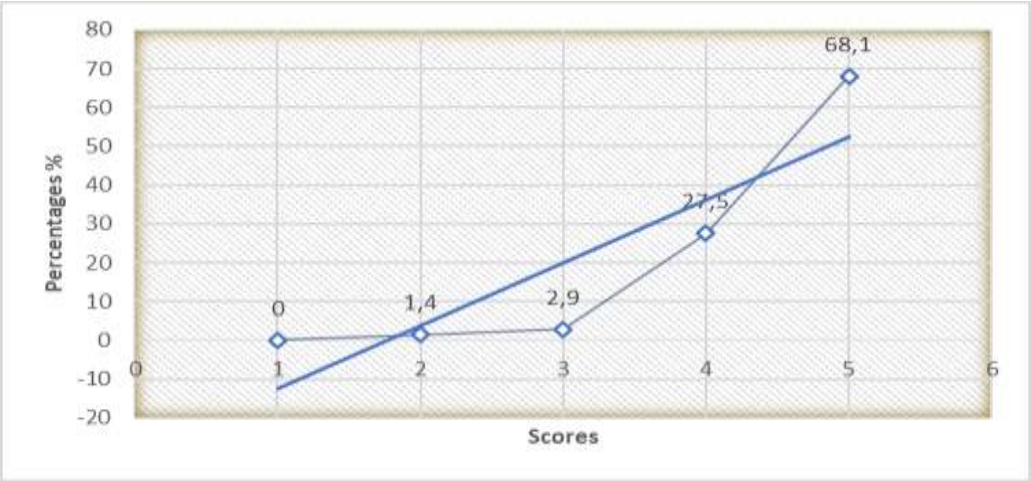



Fig. 1. Results of lecturers' self-assessment of their engagement level with digital resources in teaching psychological and pedagogical disciplines at higher education institutions

Addressing the second objective, a relationship was established between lecturers' pedagogical experience and the extent of using digital teaching tools in these disciplines. As shown in Fig. 2, the vast majority of respondents (82.6**%**) who actively use digital resources have over 10 years of experience, suggesting widespread adoption among experienced lecturers, not just young ones.

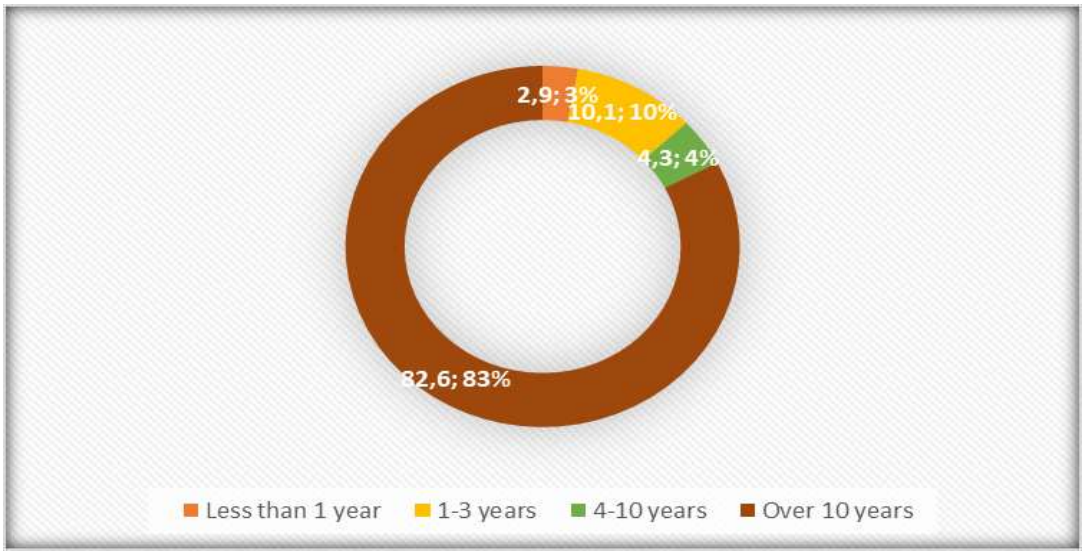



Fig. 2. Relationship between lecturers' pedagogical experience and the level of using digital teaching tools in teaching psychological and pedagogical disciplines

This confirms the positive trend toward adopting innovative, non-traditional teaching models. The implementation of distance and blended learning during the COVID-19 pandemic spurred widespread use of online platforms, enhancing lecturers' digital competence. The ongoing war in Ukraine against Russian aggression further expanded lecturers' practical experience with digital tools, ensuring educational continuity despite limited physical access to higher education institutions.

The relationship between lecturers' pedagogical experience and digital teaching tools usage was analyzed across three groups (1-3 years; 4-10 years; over 10 years). All groups showed 100% of responses at 4-5 points, confirmed by descriptive analysis and Pearson's correlation coefficient (Excel). These results indicate complete consistency between experience and engagement with digital teaching tools, regardless of lecturers' tenure.

Optimization strategies for digital resources were substantiated based on their high adoption rate (95.6%) despite minimal low ratings (4.3%). Digital tools proved most effective in practice-oriented learning (projects, case studies, debates, microgroup work). However, their use in student-centered (personalized) learning [8–10] and traditional formats requires methodological support, lecturer training, and administrative backing. Accordingly, systematic training on digital platforms, interactive, and research methods is recommended for departmental methodological work.

**Conclusion**. The analysis of lecturers' engagement with digital resources revealed that 95.6% of respondents actively use digital resources in teaching psychological and pedagogical disciplines, indicating a high level of professional readiness to enhance the educational process. A strong relationship was found between lecturers' pedagogical experience and their engagement with digital teaching tools, characteristic of both young lecturers and experienced ones with over 10 years of service, signaling positive dynamics in developing the teaching staff's digital competence. Meanwhile, the small proportion of lecturers with low usage (4.3%) stems from discipline-specific challenges, large student groups, or limited preparation for digital innovations, underscoring the need for systemic measures: instructional-methodological training, administrative support, and continuous professional development. Thus, lecturers' engagement with digital resources serves as an indicator of the academic community's professional openness to change and a foundation for further optimizing psychological and pedagogical training of future specialists within competence-based and student-centered approaches.

## References


1. Yu Zhao, Ana María Pinto Llorente, María Cruz Sánchez Gómez, Digital competence in higher education research: A systematic literature review, Computers & Education, Volume 168, 2021, 104212, https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104212
2. Fernández-Batanero, J. M., Román-Graván, P., Montenegro-Rueda, M., López-Meneses, E., & Fernández-Cerero, J. (2021). Digital Teaching Competence in Higher Education: A Systematic Review. *Education Sciences*, *11*(11), 689. https://doi.org/10.3390/educsci11110689
3. Basilotta-Gómez-Pablos, V., Matarranz, M., Casado-Aranda, LA. *et al.* Teachers' digital competencies in higher education: a systematic literature review. *Int J Educ Technol High Educ* **19**, 8 (2022). https://doi.org/10.1186/s41239-021-00312-8
4. Polly, D., Martin, F. & Guilbaud, T.C. Examining barriers and desired supports to increase faculty members' use of digital technologies: perspectives of faculty, staff and administrators. *J Comput High Educ* **33**, 135–156 (2021). https://doi.org/10.1007/s12528-020-09259-7
5. Sydorenko, V. V., Akhnovska, I. O., Smirnov, S., Verbovskyi, I., & Melnychuk, O. V. (2024). Improvement of higher education: how to bridge the digital divide during the transformation?. *Journal of Education and Learning (EduLearn)*, *18*(3), 1001-1014 https://doi.org/10.11591/edulearn.v18i3.21078
6. Zhang, J., & Wu, Y. (2025). Impact of university teachers' digital teaching skills on teaching quality in higher education. *Cogent Education*, *12*(1), 2436706, https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2436706
7. de Juana-Espinosa, S. A., Brotons, M., Sabater, V., & Stankevičiūtė, Ž. (2023). An analysis of best practices to enhance higher education teaching staff digital and multimedia skills. *Human systems management*, *42*(2), 193-207, https://doi.org/10.3233/HSM-220060
8. Kerimbayev, N., Umirzakova, Z., Shadiev, R. *et al.* A student-centered approach using modern technologies in distance learning: a systematic review of the literature. *Smart Learn. Environ.* **10**, 61 (2023). https://doi.org/10.1186/s40561-023-00280-8
9. Mastrokoukou, S., Kaliris, A., Donche, V., Chauliac, M., Karagiannopoulou, E., Christodoulides, P., &Longobardi, C. (2022, March). Rediscovering teaching in university: a scoping review of teacher effectivenessin in higher education. Frontiers in Education, 7, 861458. Frontiers Media SA. https://doi.org/10.3389/feduc.2022.861458
10. Robertson, L., Porter, E., Smith, M. A., & Jacobs, S. (2021). Evidence-Based Course Modification to Support Learner-Centered and Student-Driven Teaching in a Pandemic: Leveraging Digital and Physical Spacefor Accessible, Equitable, and Motivating Experiential Learning and Scientific Inquiry in a First-Year Biology Course. International Journal of Higher Education, 10(7), 96-109. https://doi.org/10.5430/ijhe.v10n7p96

# AI-ENHANCED DIGITAL LEARNING FACILITIES FOR POSTGRADUATE CONFERENCE INTERPRETER TRAINING: A CASE STUDY OF LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

**Romanyshyn V., Albota S., Shyika Yu., Dumyn A.**
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract**. The rapid digitalization of higher education has significantly transformed specialized fields such as conference interpreting, where practical training and access to authentic materials are essential for professional development. This paper examines the implementation of an AI-driven digital platform for the postgraduate conference interpreting course at Lviv Polytechnic National University (LPNU). The platform integrates a learning management system, remote simultaneous interpreting simulations, AI-assisted feedback tools, and domain-specific training materials, creating an immersive blended learning environment. The study analyzes how this approach enhances students' skills in consecutive and simultaneous interpreting, improves cognitive load management, and develops technological competence. The findings indicate that the platform effectively connects theoretical instruction with practical training and supports interpreter preparation in multilingual professional contexts aligned with international standards.

**Keywords**: Conference Interpreting, Postgraduate Education, Digital Platform, E-learning, Remote Simultaneous Interpreting, LPNU, Professional Training, EU Standards, Blended Learning, Interpreter Competence.

**Introduction**. Currently, digital transformation in higher education has profoundly affected specialized fields, including conference interpreting. Postgraduate programs are increasingly adopting digital platforms to enhance teaching efficiency, provide authentic practice materials, and simulate professional environments [1-2]. Lviv Polytechnic National University (LPNU) has recently implemented an advanced digital platform to support its postgraduate course in conference interpreting, combining e-learning tools, remote interpreting simulations, and interactive resources. This innovation reflects the growing need for interpreters who are not only linguistically proficient but also technologically competent and adaptable to diverse professional contexts. The integration of digital tools offers an opportunity to bridge theoretical knowledge and practical skills, preparing graduates for work in EU institutions and international organizations [3].

**The purpose of the work** is to provide a theoretically grounded and empirically informed analysis of the role of a digital platform in enhancing the effectiveness of postgraduate conference interpreting training at Lviv Polytechnic National University. The research aims to investigate the platform's impact on the development of consecutive and simultaneous interpreting competencies through the integration of authentic materials, structured practice, and interactive learning environments. Furthermore, the study seeks to evaluate the platform's pedagogical effectiveness in fostering cognitive, linguistic, and professional skills, as well as to formulate evidence-based recommendations for the optimization of digital interpreter training tools in alignment with international standards and best practices within the European Union and global interpreting frameworks.

**Formulation of the problem**. Despite the growing use of digital technologies in higher education, conference interpreting remains a practice-oriented discipline that presents challenges for digital integration [2]. Traditional training methods, based on in-person instruction and physical interpreting booths, do not fully utilize technologies capable of simulating real interpreting environments [3]. Students frequently face cognitive overload during interpreting tasks and often lack access to diverse domain-specific materials [4]. Moreover, many programmes still lack integrated digital environments that provide structured content, feedback, and performance analysis [5]. Therefore, the key challenge is to develop a comprehensive digital platform that effectively combines theoretical instruction with practical interpreter training.

**Solving the problem**. To address these challenges, LPNU developed a digital platform [5] tailored for postgraduate conference interpreting (Fig. 1).

The platform combines several pedagogical and technological components:

Learning Management System (LMS) Integration: The platform provides a structured environment for delivering lectures, reading materials, exercises, and assessments. Students access multimedia content, including videos of authentic speeches, domain-specific glossaries, and interactive exercises, enabling a self-paced and scaffolded learning approach [4].

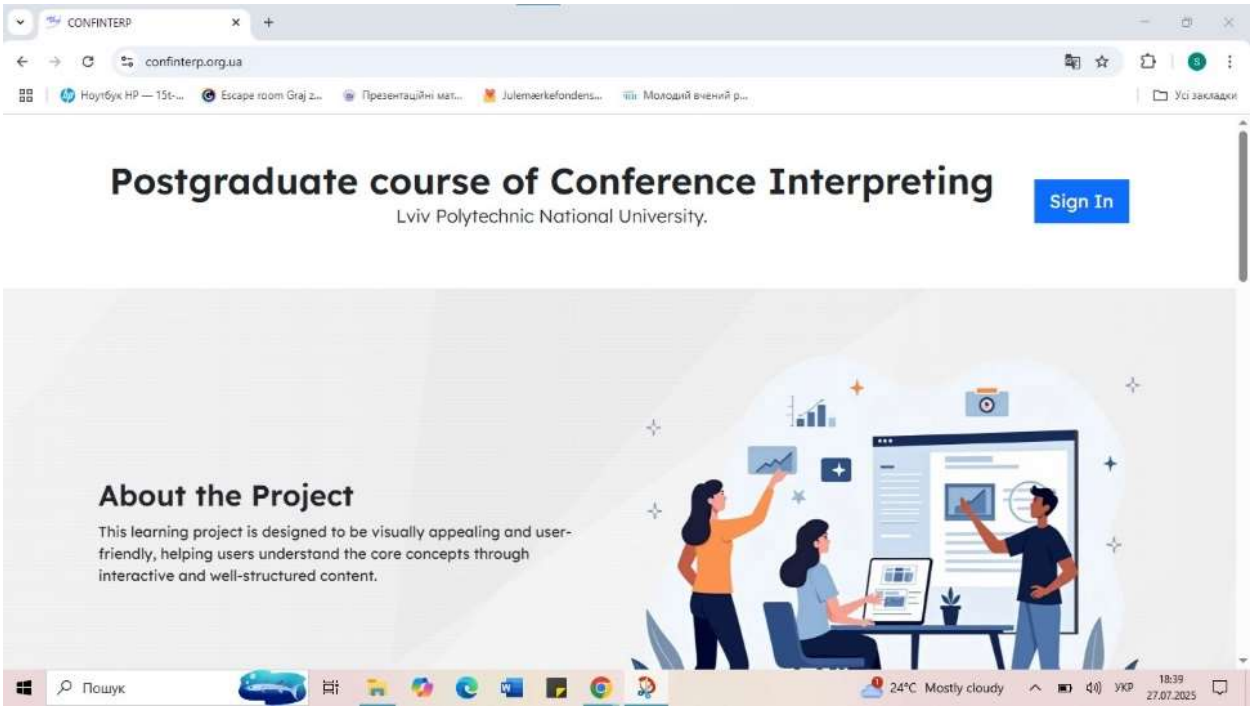



Fig. 1. LPNU Digital platform for the Applied Linguistics Department Postgraduate course of Conference Interpreting

The LPNU digital environment enables the simulation of real conference interpreting settings through a remote simultaneous interpreting (RSI) system deployed on the university's own servers. This infrastructure allows students to practice interpreting in virtual booths, coordinate with peers, and perform live interpreting tasks in conditions that closely resemble professional conference environments. Such simulations enhance both technical proficiency and cognitive resilience under conditions of high information density and time pressure [1]. The integration of RSI technologies into interpreter training reflects broader developments in the profession, where remote and hybrid interpreting formats are increasingly common.

Content Categorization and Difficulty Levels: Training materials are classified by subject domains related to EU and European Parliament discourse, diplomatic, political and technological topics and graded from beginner to advanced [3]. This allows students to progressively build competence while exposing them to professional registers and terminologies.

Feedback and Analytics Tools: The platform integrates performance tracking dashboards, automated transcription analysis, and rubric-based evaluations [5]. Trainers provide real-time annotations and peer assessments are encouraged, creating a feedback-rich environment that promotes self-reflection and continuous improvement.

AI and Adaptive Learning Enhancements: Emerging AI-based tools assist in pronunciation evaluation, memory retention exercises, and automated accuracy checks [2]. Adaptive learning algorithms recommend exercises tailored to each student's proficiency and performance, fostering personalized learning paths.

Blended Learning Approach: LPNU's platform complements digital modules with live in-person or hybrid workshops. This combination ensures that students experience both theoretical knowledge acquisition and practical skill application, essential for interpreting at high-stakes events [1].

Alignment with EU and International Standards: All materials and practice scenarios are aligned with professional requirements, ensuring that graduates are ready for employment in EU institutions, international organizations, and other multilingual professional settings [4].

Another important component of the digital platform is the integration of artificial intelligence tools for the preliminary evaluation of students' interpreting performance. AI-based modules analyse students' responses by processing audio recordings of interpreting tasks and comparing them with reference texts. The system generates initial evaluation indicators related to lexical accuracy, semantic similarity, and structural coherence. This approach significantly accelerates the assessment process and expands the analytical capabilities of the learning environment, allowing instructors to access both the original audio recordings and AI-generated preliminary evaluations, thus facilitating faster feedback and more efficient monitoring of students' progress [6].

By integrating these components, LPNU's platform addresses the primary challenges of interpreting education: accessibility to authentic materials, practice under realistic conditions, performance assessment, and learner engagement. Students report improved confidence, better cognitive load management, and higher proficiency in both consecutive and simultaneous interpreting

**Conclusion**. The implementation of a dedicated digital platform for postgraduate conference interpreting at LPNU demonstrates the transformative potential of technology in specialized higher education. By combining LMS capabilities, remote interpreting simulations, AI-assisted tools, and structured content, the platform bridges the gap between theory and practice. It enhances learner engagement, provides authentic professional scenarios, and fosters technical and cognitive skill development. The approach aligns with EU and global professional standards, preparing graduates for immediate employability in multilingual and international contexts. Future research may focus on integrating advanced AI-powered assessment tools, expanding multilingual corpora, and developing cross-institutional collaborative modules to further enrich the learning experience.

## References


1. Pöchhacker, F.: Introducing Interpreting Studies, 2nd ed. Routledge, London–New York (2016).
2. Gile, D.: Basic Concepts and Models for Interpreter and Translator Training, Rev. ed. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam–Philadelphia (2009).
3. Kurz, I.: Teaching Interpreting: Where Are We and Where Are We Going? Translation & Interpreting Studies, 7(2), pp. 180–205 (2012).
4. European Commission: Interpretation Training Toolbox. European Commission, Brussels (2023). Available at: https://commission.europa.eu/education/skills-and-qualifications/develop-your-language-skills/interpretation-training-toolbox_en
5. LPNU Digital Platform Documentation: Platforma: Digital Learning Environment for Conference Interpreting. Lviv Polytechnic National University, Lviv (2025). Available at: https://confinterp.org.ua/
6. Dumyn, A.: Hybrid Metrics for Text Quality Assessment Based on Contextual Weighting. Tavria Scientific Journal, 4(1), pp. 85–93 (2025).



**Acknowledgements.** The digital platform described in this study was developed at Lviv Polytechnic National University within the framework of a grant initiative funded by the European Parliament's Directorate-General for Logistics and Interpretation for Conferences (DG LING). The project supported the development and pilot implementation of AI-enhanced digital learning facilities designed to improve postgraduate training in conference interpreting.

# MODELING TRANSPARENT INTERACTION BETWEEN EDUCATION AND BUSINESS IN A DIGITAL ECONOMY BASED ON BLOCKCHAIN

**Shcherbakov S.S., Shyrokorad D.V.**
National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

**Abstract.** The paper investigates the conceptual model of the TEBI system (Transparent Education-Business Interaction) — a blockchain-based platform for transparent cooperation between educational institutions and businesses. The proposed hybrid architecture eliminates information asymmetry between employers and graduates through cryptographically verified records of educational achievements stored in a distributed ledger. The system integrates four stakeholder groups under the Quadruple Helix model, ensuring data immutability and transparency via a consortium blockchain with Proof of Authority consensus. An integrated Graph Neural Network (GNN) model provides a predictive component for assessing the alignment between a candidate's profile and job requirements. An ERC-20 tokenomics model forms a closed educational-economic ecosystem with built-in incentives for all participants.

**Keywords:** blockchain verification, information asymmetry, Quadruple Helix, graph neural networks, education digitalization, TEBI system, NFT certificates.

**Introduction.** The digitalization of the economy has intensified the mismatch between the skills of higher education graduates and the actual demands of the labor market. Information asymmetry between employers and applicants is one of the key drivers of structural unemployment, even where graduates are formally well prepared [1]. Employers are forced to rely on self-declared signals — résumés and diplomas — whose authenticity is practically impossible to verify in real time. At the same time, higher education institutions rarely receive systematic feedback on whether their curricula align with market requirements.

Blockchain — a decentralized distributed ledger ensuring data immutability, transparency, and cryptographic verifiability — represents a promising technological solution for eliminating this asymmetry [2]. The application of blockchain in educational credential verification is being actively investigated by international research communities [3].

**Formulation of the Problem.** The purpose of the study is to develop a conceptual model and architectural framework for the TEBI (Transparent Education-Business Interaction) system based on blockchain technologies, enabling reliable skill verification for all stakeholders in the digital economy.

**Solving the Problem.** The theoretical foundation of the study is the Quadruple Helix model, which presupposes equal synergy among universities, businesses, government, and civil society [1; 4]. The dual form of education demonstrates significantly higher graduate employment rates compared to traditional models. Despite the diversity of partnership approaches, none of the existing models addresses the core challenges of the digital age: how to verify skills in real time, how to automate the formation of a verified portfolio, and how to protect personal data.

Blockchain technologies have proven effective in educational credential verification: systems such as Blockcerts (MIT Media Lab), OpenCerts (Singapore), and EduCTX (IEEE Access) have demonstrated the technical capability of decentralized ledgers to ensure the authenticity and immutability of educational records [5]. A systematic review of 120+ publications confirms that the key advantage of blockchain over centralized registries lies in the elimination of a single point of failure [3].

The TEBI system integrates four stakeholder groups: educational institutions, business entities, regulatory bodies, and end users. Each verified event in an educational trajectory — a grade, an internship, a confirmed competency — is recorded on the blockchain with the cryptographic signature of an authorized verifier. To avoid the transaction costs of public networks, a consortium-based Proof of Authority (PoA) mechanism is employed, where validators are exclusively accredited institutions [6]. The hybrid architecture separates layers: personal data are stored in a secured relational database, while the public blockchain contains only cryptographic

hashes. NFT certificates record verified achievements: hash, specialty code, EQF level, and issuer signature.

The conceptual database model encompasses four functional domains: educational institution, business organization, regulatory body, and individual. The logical model is normalized to the fifth normal form; table partitioning by temporal attributes accelerates analytical queries. Formal verification of business rules using set-theoretic methods provides a mathematically proven consistency of the system.

Graph Neural Networks (GNN) model the labor market as a heterogeneous graph in which nodes represent individuals, competencies, and vacancies [7]. The Graph Attention Network (GAT) attention mechanism differentiates skill weights depending on job context. The authors' Effective Experience Score (EES) metric accounts for: the learning curve of novices, employer confirmation of experience, synergy among complementary competencies, and temporal decay of outdated skills.

The ERC-20 tokenomics model forms a closed educational-economic ecosystem: verified achievements are tokenized and automatically credited to lecturers, mentors, and institutions. Deflationary mechanisms — transaction fees and periodic token burning — ensure long-term stability of the internal economy. The integration methodology encompasses eight sequential phases adapted for three types of participating organizations.

**Conclusion.** The study has produced a conceptual model of the TEBI system [8] — a blockchain-based platform for transparent education-business interaction. The proposed hybrid two-layer architecture eliminates information asymmetry between employers and graduates through cryptographically verified recording of educational achievements in a distributed ledger. Formal verification of business rules using set-theoretic methods ensures a mathematically proven system consistency. Integration of GNN provides a predictive component that assesses the alignment of a candidate's profile with job requirements, accounting for semantic relationships between competencies. The ERC-20 tokenomics model forms a closed educational-economic ecosystem with built-in incentives for all stakeholders.

The practical significance of the study lies in the applicability of the system to digitalizing educational qualification processes at higher education institutions and enterprises across various economic sectors. Further research involves practical testing of the system, refinement of the GNN model on real labor market data, and expansion of interoperability with international educational registries.

## References


1. Carayannis E. G., Campbell D. F. J.: *Mode 3 and the Quadruple Helix: toward a 21st century fractal innovation ecosystem.* International Journal of Technology Management, Vol. 46, No. 3–4, pp. 201–234, (2009). https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374
2. Nakamoto S.: *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.* (2008). https://bitcoin.org/bitcoin.pdf
3. Rustemi A., Dalipi F., Atanasovski V., Risteski A.: *A systematic literature review on blockchain-based systems for academic certificate verification.* IEEE Access, Vol. 11, pp. 64679–64696, (2023). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289598
4. Carayannis E. G., Morawska-Jancelewicz J.: *The Futures of Europe: Society 5.0 and Industry 5.0 as Driving Forces of Future Universities.* Journal of the Knowledge Economy, Vol. 13, No. 4, pp. 3445–3471, (2022). https://doi.org/10.1007/s13132-022-00984-1
5. Turkanoviić M., Hölbl M., Košič K., Heričko M., Kamišalić A.: *EduCTX: A Blockchain-Based Higher Education Credit Platform.* IEEE Access, Vol. 6, pp. 5112–5127, (2018). https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2812190
6. Alammary A., Alhazmi S., Almasri M., Gillani S.: *Blockchain-Based Applications in Education: A Systematic Review.* Applied Sciences, Vol. 9, No. 12, Article 2400, (2019). https://doi.org/10.3390/app9122400
7. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., Wang L., Li C., Sun M.: *Graph Neural Networks: A Review of Methods and Applications.* AI Open, Vol. 1, pp. 57–81, (2020). https://doi.org/10.1016/j.aiopen.2021.01.001
8. Shcherbakov, S., Shyrokorad, D.: Analytical model of transparent education-business interaction based on blockchain technology. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security 1, 286–294 (2026). https://doi.org/10.32782/IT/2026-1-34

# VR SPACE OF A PHYSICAL LABORATORY FOR DISTANCE LEARNING

**Skorenkyy Yu., Kramar O.**
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

**Abstract.** This study addresses the integration of immersive technologies into modern educational practices, focusing on the development of distance learning solutions for physics education. The primary object of the research is the virtual educational environment, which serves as a flexible, safe, and accessible alternative to traditional, resource-intensive physical laboratories. The main purpose of this work was to prototype a virtual space for a physical laboratory using Unreal Engine for seamless integration into the ATutor e-Learning Management System. Utilizing Inline Frame HTML elements to integrate these virtual setups directly into the ATutor environment is proposed. A virtual learning environment that allows users to interact with laboratory equipment to simulate physics experiments has been successfully developed. The implementation of this VR laboratory acts as a highly effective, non-standard optimization of traditional offline teaching methods.

**Keywords**: Physics Education, Virtual Experiment, Virtual Reality, Distance Learning.

**Introduction.** The current stage of educational technologies development is characterized by the active implementation of eXtended Reality (XR) using computer simulations in educational activities. Traditional laboratory setups for modern physical experiments are generally quite expensive and need specialized spaces. Virtual laboratories overcome these obstacles, providing high learning flexibility, cost reduction, and a lower environmental impact, making them a key instrument for the sustainable development of higher education [1]. The use of Virtual Reality (VR) is particularly effective because of the presence effect and the emphasis on detailed visualization, which makes the process of assimilating material efficient and successful. In addition to traditional learning conditions in a real laboratory, digital environments allow for multiple repetitions of experiments and learning from one's own mistakes without the risk of damaging equipment. It is also very important that immersive tools and platforms make educational experiments accessible to a wide range of people, since the possibility of voice control or an adaptive interface ensures full involvement in practical training for students with special educational needs (e.g., with visual or motor impairments), and other disadvantaged learners.

**The purpose of the work** is to prototype the virtual space of a physical laboratory using Unreal® cross-platform engine and to create a set of 3D models of laboratory setups for integration into an e-learning management system (LMS) ATutor.

**Formulation of the problem.** Review of literature shows that the use of VR in educational settings improves student engagement across cognitive, behavioral, and affective dimensions [2]. The interactivity of VR environments kindles user curiosity and facilitates dynamic engagements that are difficult to achieve in traditional classroom settings. Essentially, virtual laboratories create an interactive 3D space for simulating real or hypothetical situations, where users can interact with objects in real-time, testing methodologies and equipment that, for objective reasons, are unavailable in physical educational institutions. It should be noted that the highest efficiency can be achieved by combining virtual and real experiments. Virtual experiments act as an ideal preparatory stage for students, allowing them to come to the real laboratory with an already formed comprehension of the processes and improved skills. Researchers [3] note that the effectiveness of a virtual laboratory in training is significantly affected by the accuracy of the experiment's implementation, appropriate interactivity, accessibility, and the ability to simulate real processes, as well as adaptability to the user through content personalization, but in accordance with the curriculum.

**Solving the problem.** When designing immersive educational spaces aimed at the active interaction of users with the environment and with each other, the developers' focus should shift from the implementation of resource-intensive photorealism to providing a high-quality learning experience. The key requirement is the creation of an intuitively understandable interface architecture. To do this, developers should use concise icons, context pop-ups, and clear spatial

restrictions within zoned working areas, which will help the student make decisions easily. To effectively manage the student's focus, it is worth applying contour highlighting of interacting elements, dynamic brightness changes, and the integration of musical inserts or spatial sound. The effect of true presence in a virtual laboratory is formed primarily due to the correct geometric scaling of the devices and realistic sounds of the physical environment, rather than excessive texture detailing. The work [4] stresses the importance of step-by-step prompts that guide the experiment, provide information (audio and text), and allows moving to the next stage after execution of the current task. The paper [5] claims that with collaboration tools and content sharing integrated in the LMS, virtual environments improve the quality of learning.

The present paper describes the structure and principles of implementing the VR space of the mechanics and molecular physics laboratory of Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Earlier, the authors demonstrated the effectiveness of implementing extended reality tools at the university [6], particularly augmented reality, to digitalize the teaching and learning [7].

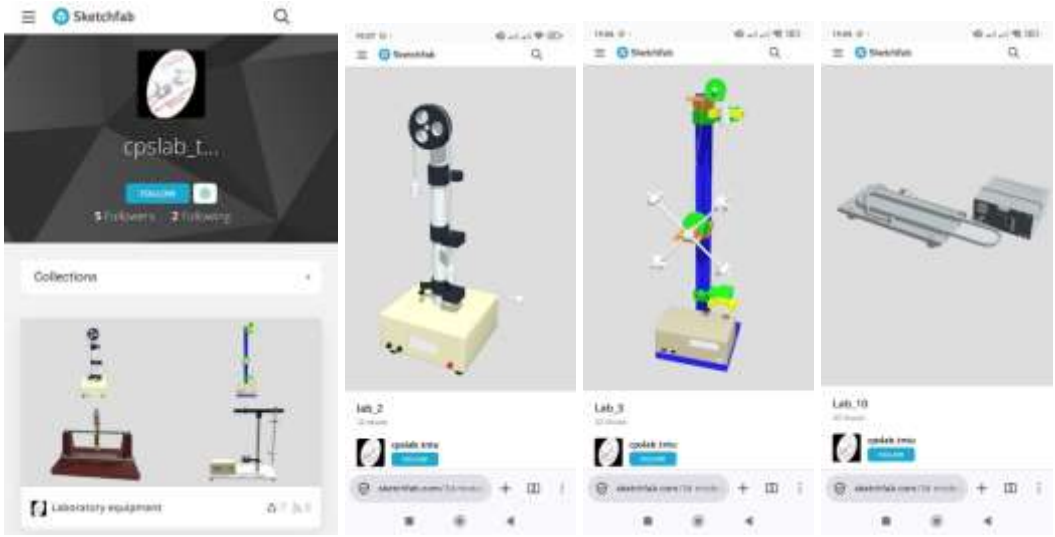



Fig. 1. Examples of 3D models of laboratory equipment hosted on the Sketchfab platform

The developed virtual learning environment allows the user to interact with laboratory equipment (see Fig. 1) to simulate an educational physics experiment. Rendering of the models was carried out using Autodesk 3ds MAX and Blender. Based on the models imported into the Unreal Engine environments, a concept of the virtual educational space was created (see Figs. 2 and 3). For the integration of individual virtual laboratory setups into the ATutor learning environment using an Inline Frame HTML element has been proposed.



Fig. 2. General view of the laboratory space



Fig. 3. Work area with setups



Fig. 4. Entering the setup interaction menu

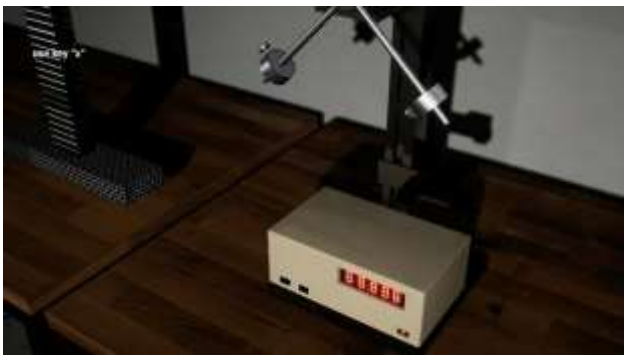


Fig. 5. Beginning of the experiment

The implementation of interactive virtual experiments (Figs. 4 and 5) in the laboratory VR space (created with Unreal Engine or Unity) is a novel, effective way of improving online teaching.

**Conclusions.** The implementation of virtual reality (VR) laboratories provides a flexible, cost-effective, and safe alternative to traditional physical setups, making it a key tool for sustainable higher education. VR laboratories expand accessibility for a wider demographic, ensuring that students in isolated regions or those with special educational needs can fully participate in practical training through adaptive interfaces and voice control. As directions for future development, the authors see improvement of perceptual characteristics to better manage student focus, which includes implementing contour highlighting, dynamic brightness adjustments, and spatial sound integration. Development and refinement of algorithms that guide students through experiments with short audio and text prompts should be achieved, ensuring tasks are completed correctly before advancing.

**Acknowledgments.** Contributions of TNTU students O. Parail, K. Kozachuk, A. Vitushynskyi to the development of the virtual laboratory environment are gratefully acknowledged.

## References

1. Zhang, N., Liu, Y.: Design and implementation of virtual laboratories for higher education sustainability: a case study of Nankai University. Front. Educ. 8, 1322263, (2024). doi: 10.3389/feduc.2023.1322263
2. Alnaser, D., Forawi, S.: Investigating the Effects of Virtual Laboratories on Students' Motivation and Attitudes Toward Science. Science Education International. 35(2), 154–162, (2024). doi: 10.33828/sei.v35.i2.9
3. Kolodii, V., Koreneva, I., Prokopenko, N., Huda, O., Shaforost, Y.: Development of interactive virtual laboratories for distance learning in natural sciences. Revista Eduweb. 19(3), 153-168, (2025). doi: 10.46502/issn.1856-7576/2025.19.03.10
4. Myburgh, P.H.: Reflecting on the Creation of Virtual Laboratory Experiences for Biology Students. Front. Educ. 7, 796840, (2022). doi: 10.3389/feduc.2022.796840
5. Deac, G., Deac, C., Popa, C.L., et al.: Virtual Reality Laboratory for Distance Learning. International Journal of Modeling and Optimization. 12, 49-53, (2022).
6. Kramar, O., Drohobytskiy, Y., Skorenkyy, Y., Rokitskyi, O., Kunanets, N., Pasichnyk, V., Matsiuk, O.: Augmented Reality-assisted Cyber-Physical Systems of Smart University Campus. 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2, 309-313, (2020). doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321951
7. Skorenkyy, Yu., Kozak, R., Zagorodna, N., Kramar, O., Baran, I.: Use of augmented reality-enabled prototyping of cyber-physical systems for improving cyber-security education. Journal of Physics: Conference Series. 1840(1), 012026, (2021).

# THE EFFECTIVENESS OF THE METHODOLOGICAL SYSTEM FOR THE TECHNICAL TRAINING OF IT SPECIALISTS IN THE CONTEXT OF DEVELOPING PROFESSIONAL COMPETENCIES

**Stetsyk S.**
Dragomanov Ukrainian State University

**Abstract.** This study addresses the issue of improving the technical training of future IT specialists in the context of the evolving digital environment and the implementation of cyber-physical systems. The aim of the study is to provide a theoretical rationale for, develop, and experimentally verify the effectiveness of an integrated methodological system for fostering the professional competencies of students pursuing IT specializations. The object of the study is the process of professional training of future IT specialists in higher education institutions, and the subject is a methodological system of technical training based on interdisciplinary integration. To achieve the set objective, theoretical methods of analyzing scientific sources and modeling the educational process were used, as well as empirical methods: pedagogical experiments, testing, questionnaires and qualitative analysis of student portfolios. The methodological system combined the disciplines «Fundamentals of Robotic Systems», «Human-Machine Interface» and «Software Project Management» using a project-based approach, Digital Twins and the flexible Scrum/Agile methodologies. The research results showed that students in the experimental group completed tasks involving the configuration of hardware-software complexes 28% faster and demonstrated a higher level of proficiency in User-Centered Design and project management skills. It was established that the integrated methodological system ensures more effective development of comprehensive engineering and management competencies compared to the traditional approach.

**Keywords:** methodological framework; professional competences; IT education; competence-based approach; pedagogical experiment; formative assessment.

**Introduction.** The development of the digital environment, accompanied by the introduction of cyber-physical systems, is creating a gap between the level of training of IT graduates and the actual requirements of employers. According to forecasts by the US Bureau of Labour Statistics, employment in the information technology sector is set to grow at a rate of 11% between 2024 and 2034 – almost three times faster than the average economic growth rate [3]. According to CompTIA, the technology sector will grow twice as fast as the overall labour market [4]. There is a need to review approaches to such training in the context of developing professional competencies, alongside updating the methodological systems of technical training in higher education institutions, which should ensure synergy between fundamental knowledge, engineering skills and 'soft' competencies.

**The purpose of the work.** The aim of our study is to provide a theoretical basis for, develop and experimentally test the effectiveness of a methodological framework for the technical training of future IT specialists, designed to foster the comprehensive development of their professional competencies.

**Formulation of the problem.** The issue of professional training for future programmers, software engineers and systems analysts has been addressed by V. Bykov [1], Y. Trius [2], S. Semerikov [7] and others. An analysis of the current state of IT education has revealed a discrepancy between the complex nature of real-world engineering tasks in the IT industry and the fragmented nature of traditional curricula. Higher education students often study algorithms, databases and hardware as isolated disciplines. There is a didactic gap in the formation of a holistic view, linked to the fact that students experience difficulties in integrating knowledge of physical processes, for example, when studying robotics, principles of user interaction (human-machine interface) and methodologies for team-based project development (the discipline of software project management). The scientific and methodological challenge lies in identifying effective didactic conditions and tools to unite these disparate components into a single educational cycle that simulates a real production environment.

**Solving the problem.** To address the problem outlined above, we have developed and implemented an interdisciplinary teaching framework based on the integration of three key academic disciplines: «Fundamentals of Robotic Systems» (hardware engineering), «Human-Machine Interface» (interaction design) and «Software Project Management» (project management and development methodologies).

The effectiveness of the proposed system was assessed using a mixed-methods research design. During the 2024-2025 academic year, a formative pedagogical experiment was conducted at the Faculty of Mathematics, Computer Science and Physics of the Dragomanov Ukrainian State University. A total of 124 students studying for degrees in specializations F2 «Software Engineering» and F3 «Computer Science» took part. The sample was divided into a control group (CG, n = 61, taught using a traditional sequential approach) and an experimental group (EG, n = 63, taught using an integrated methodological system with a project-based approach) through stratified random sampling. The representativeness of the sample and the initial homogeneity of the groups were confirmed by the results of the initial knowledge assessment.

The experimental results were analyzed using methods of mathematical statistics with the IBM SPSS Statistics software package (https://www.ibm.com/products/spss-statistics). To demonstrate the effectiveness of the methodological system, the differences between the indicators of the CG and the EG at the final stage were tested using Student's *t*-test for independent samples (for quantitative assessments) and Pearson's $\chi^2$ test (for qualitative portfolio indicators). The level of statistical significance was set at $p > 0.05$.

During the study of the subject «Fundamentals of Robotic Systems», we made active use of online simulators (Digital Twins); students in the experimental group (EG) had the opportunity to safely model cyber-physical processes. The level of mastery of operational skills in the EG was determined through testing. It was found that students completed tasks involving the configuration of hardware-software complexes 28 % faster and with fewer architectural errors compared to the control group (CG).

A qualitative analysis of student portfolios was conducted and revealed that the integration of students' knowledge from the course «Human-Machine Interface» enabled students in the EG to create ergonomic solutions. Project evaluation confirmed a higher level of understanding of the principles of User-Centered Design among students in the experimental group.

The implementation of international standards (PMBOK Guide [6], PRINCE2 [5] and others) and agile methodologies (Scrum/Agile) directly into the technical project development process facilitated the development of team collaboration. According to the final survey, 84 % of respondents from the EG demonstrated a high level of ability to identify risks and manage time, whereas in the CG this figure was only 48 %.

**Conclusion.** The study confirms the hypothesis that the implementation of an integrated methodological system for the technical training of IT specialists - which combines the study of hardware systems, user interfaces and project management - is significantly more effective than the traditional fragmented approach. The proposed system provides a synergistic effect; it not only enhances the acquisition of fundamental technical knowledge but also develops comprehensive engineering and management competencies that fully meet the requirements of the IT industry. Prospects for further research lie in adapting the developed system to the use of generative artificial intelligence tools and immersive technologies (VR/AR) in the educational process.

## References


1. Bykov, V. Yu. Developing the competencies of participants in the educational process based on cloud-based information and educational systems: a research paper presented at the meeting of the Presidium of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine on 18 March 2021. Bulletin of the National Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine, Vol. 3, No. 1, March 2021, P. 1-6. DOI: https://doi.org/10.37472/2707-305X-2021-3-1-2-3 (in Ukrainian)
2. Trius, Y., Tkachenko, E. Characteristics of IT project team management in a remote working environment. URSS. 2024, 105-112. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.105-112 (in Ukrainian)

3. Bureau of Labor Statistics. *Computer and Information Technology Occupations*. 2024. URL: https://www.bls.gov/ooh/computer-and-information-technology/home.htm
4. CompTIA. *State of the Tech Workforce 2024*. URL: https://www.comptia.org/resources/research/state-of-the-tech-workforce-2024/
5. PRINCE2 is a project management methodology, applicable to all types of projects. URL: https://prince2.wiki/
6. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 7th ed. Project Management Institute, Inc., 2021. URL: https://pmiukraine.org/pmbok7
7. Semerikov S. O., Striuk A. M. The evolving landscape of computer science and software engineering: Trends, challenges, and future directions. In: CEUR Workshop Proceedings. 2025. P. 1-46. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3917/paper00.pdf

# MULTIAGENTIC LEARNING SYSTEMS: AN ONTOLOGICAL APPROACH

**Tkachenko K.O.[1], Tkachenko O.A.[2], Tkachenko O.I.[3]**
[1]National State University "Kyiv Aviation Institute", Ukraine
[2]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
[3]National Transport University, Ukraine

**Abstract.** This article examines multi-agent intelligent learning systems, their requirements, and the primary agents that ensure the effective management and operation of learning processes. The proposed ontological modeling facilitates the adaptation of learning processes to learning objectives, student knowledge, and other criteria that characterize the learning process supported by multi-agent intelligent learning systems. The ontological model of the system, based on a multi-agent approach, describes the agents, their roles, and the interaction algorithm.

**Keywords**: intelligent learning systems, agents, multi-agent intelligent learning systems, ontological modeling, meta-ontology

**Introduction**. Nowadays, learning is increasingly moving online. To support variety of learning processes (e.g., learning management; knowledge monitoring and control; adapting courses to changing learning goals, conditions, and objectives [1-3]; individualizing student learning based on their interests and knowledge level; creating learning content, etc.), learning systems based on modern technologies such as artificial intelligence [4], adaptive learning systems [5, 6], multi-agent systems [7, 8], and augmented and virtual reality are being developed and actively used [9, 10].

This paper examines multi-agent intelligent learning systems, the development of which is based on an ontological approach [11, 12].

**The purpose of the work** is the development of an ontological model of a multi-agent intelligent system, based on which agents can manage the learning process, adapt the presentation and navigation tools for educational content, and build an individual learning route for the student

**Formulation of the problem**. Analysis of objects and processes in a multi-agent intelligent system, which, through the use of ontological modeling, will make it possible to increase the level of individualization and effectiveness of the educational process

**Solving the problem**. One of the key components for building an information and educational space is intelligent learning systems that implement adaptation mechanisms (based on adaptive ontologies) depending on [12, 13]:

- learning objectives,
- types of learning processes, such as:
  - providing students with and familiarizing them with the learning content of relevant learning courses,
  - managing and organizing the learning process,
  - monitoring and controlling the learning process,
  - determining the level of student knowledge (testing their knowledge),
  - generating a variety of learning content, a variety of individual/test assignments, etc.,
- the subject area being studied,
- the individual needs of the learner.

This paper examines multi-agent and adaptation technologies, as well as ontological modeling of intelligent learning systems. Modern intelligent learning systems rely on the presence/use of:

- artificial intelligence technologies, based, in particular, on:
  - modeling educational content; learning process; management of learning process;
  - using knowledge bases;
  - recommendations and assistance provided by artificial intelligence tools, such as: problem-solving support, which is based, in particular, on: intelligent decision analysis; this type of support is used to build a student model; interactive problem-solving

support; example-based problem-solving support (technology that builds on the student's successful problem-solving experience, allowing them to solve new problems using previously solved ones as examples);

- multi-agent technologies [8];
- virtual, augmented, and generalized reality technologies [9];
- adaptive technologies that take into account, in particular [1-3]: subject area specifics; active learning goals and objectives; expected learning outcomes; characteristics of learner groups; type of learning process (e.g., provision of educational content, testing of student knowledge); content of the educational content provided to the student; type of navigation along the learning trajectory for each student – the type of optimal sequence constructed for the student to study the educational content of the corresponding course (subject area, etc.);
- gamification of the learning process;
- technologies for individualizing the learning process for each student, involving the construction of an individualized course sequence for the student (curricular planning – constructing sequence of information blocks (blocks of educational content) and sequence of knowledge assessment blocks), which involves: active construction – implies the presence of learning goal (subset of concepts in the subject area being studied that must be mastered); passive sequence – implies the presence of feedback and does not require an active learning goal; it begins when the student is unable to solve problem or answer question correctly; the learning goal in this case is to provide the student with multiple options for educational content.

Multi-agent intelligent learning systems provide adaptive presentation of educational content, route building, and the presentation of fragments of educational content. The use of augmented reality allows for the creation of a unified learning space, augmented by virtual objects. A multi-agent intelligent learning system must meet the following requirements:

- support for constructing a route (sequence) for delivering elements of educational content;
- support for students in solving individual, independent problems, which includes: intelligent analysis of students' proposed solutions; interactive support for students in solving problems; support for students in solving problems by explaining solutions using examples;
- adaptive presentation of educational content and navigation through the course;
- collection and storage of information about the learner to build a corresponding model;
- access to a knowledge base containing elements of educational content, their interrelations;
- providing students with access to educational content (of varying levels of complexity and detail, depending on the goals and objectives of the learning process).

Let us consider the ontological model of a multi-agent intelligent learning system. Such systems are based on intelligent agents that interact with each other and possess knowledge of the environment in which they exist. Ontology is a specification of a subject area, including a vocabulary of terms (concepts) within the subject area and a set of relationships between them that describe how these terms relate to each other [11, 12]. The multi-agent intelligent learning system model under consideration assumes the creation of the following ontologies:

- meta-ontology, which is a repository of the subject areas studied by the student;
- ontologies of learning objects (courses, learning content elements, tests, etc.);
- ontologies of all types of agents (in particular, the student agent, the learning process management agent, the student learning path generation agent, the modeling agent, the interface and feedback agent, the learning object agent, the student knowledge monitoring agent, and the student assignment assessment agent); the ontological model of the system agents can be represented as

$$Ont_{Ag} = \langle A, R, P \rangle,$$

where $Ag$ – set of agents, $Ag = \bigcup_{i=1}^{n} Ag_i$, n is the number of agents used in multi-agent learning systems; in particular: $Ag_1$ – an agent that collects data on the learning process, which the system receives in real time, $Ag_2$ – control agent that manages/controls data transfer processes between agents within the system, $Ag_3$ – monitoring agent that analyzes the learning results of student and then issues appropriate recommendations for correlating the learning process within the system, $Ag_4$ – is an agent that tests student knowledge; $Ag_5$ – the user interface agent (student, teacher) with

the system; $R = \bigcup_{i=1}^{m} \bigcup_{j=1}^{m} R_{ij}$ is the set of relationships between agents ($R_{ij}: Ag_i \rightarrow Ag_j$). $P$ is the set of properties (including relationships from the set $R$); properties can be, in particular: informational, control, management, diagnostic, interface (e.g., of the "question-answer" type);

− user ontologies (e.g., students based on their level of knowledge, interests, course authors) based on their competencies, research interests, experience, and the methods they use, etc.).

Thus, in the developed model, agents occupy an intermediate layer in the system and are responsible for collecting and analyzing data about the student, their current knowledge, preferences, and needs. Based on this data, agents can update the learner model, predict the user's next steps, adapt the presentation and navigation tools, and build personalized learning path for the student.

**Conclusion**. The advantages of using an ontological approach to building multi-agent intelligent learning systems include, for example, the following:

− ontological modeling of agents facilitates the provision of knowledge about the surrounding world to the system, enabling the system to automatically make decisions on relevant learning issues (e.g., managing the learning process, learning paths, the level of detail/complexity/completeness of learning content elements provided to students, etc.);

− ontological models of agents are part of meta-ontology, which facilitates the autonomous functioning of these agents and, furthermore, being developed for one subject area of learning (e.g., taking into account the goals and objectives of learning, categories of system users, and their characteristics), allows for their use with minor modifications in another subject area.

## References


1. Bakhov, I. The use of adaptive and intellectual educational technologies in training of modern specialists. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-special sciences*, 1(41), pp. 14-18, (2019). https://doi.org/10.17721/1728-2217.2019.41.15-18
2. Smyrnova-Trybulska, E., Morze, N., Varchenko-Trotsenko, L. Adaptive learning in university students' opinions: Cross-border research. *Education and Information Technologies*. Vol. 27, pp. 6787-6818, (2022).
3. Wokington, C. Using adaptive learning technologies to personalize learning according to learners' interests. *Journal of Educational Psychology*, 105(4), pp. 928-932, (2013).
4. Pang, T. Y., Kootsookos, A., & Cheng, C. T. Artificial Intelligence in Higher Education Learning: Transferable Skills and Academic Integrity. *Intelligent Technologies in Education*, Advanced Online Publication. URL: https://open-publishing.org/journals/index.php/ited/article/view/1247/994. (2025).
5. Wokington, C. Adaptive Learning Systems in Higher Education: A Comprehensive Review. New York: Routledge, (2020).
6. Čep, A., Bernik, Bernik, A., Tomicic, I. Adaptive Learning Systems in Higher Education: Challenges, Trends, and Outcomes. In book: *Proceedings of the Future Technologies Conference* (FTC), Vol. 4, pp. 1-17, (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-032-07992-3_1
7. Goonatilleke, S., Hettige, B. Past, Present and Future Trends in Multi-Agent System Technology. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 55(6), pp. 723-739, (2022). https://doi.org/10.18280/jesa.550604
8. Tkachenko, K., Tkachenko, O., Tkachenko, O. Designing Intelligent Multi-agent Ontology-Based Training Systems: The Case of State University of Infrastructure and Technology. *Lecture Notes in Networks and Systems. Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing*. Springer, Vol. 463, pp. 181-192, (2022).
9. Features and benefits of Augmented Reality in education. URL: https://imascono.com/en/augmented-reality-education/
10. Marougkas, A., Troussas, C., Krouska, A., Sgouropoulou, C. Virtual reality in education: A review of learning theories, approaches and methodologies for the last decade. *Applied Sciences*, 13(5), 2894, (2023). https://doi.org/10.3390/app13052894
11. Guarino, N., Oberle, D., Staab, S. What Is an Ontology? Handbook on Ontologies. Handbooks on Ontologies, pp. 1-17, (2009). https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_0
12. Tkachenko, K. Using Ontological Modeling by Intellectualization of Learning Processes. *Digital platform: information technologies in the sociocultural sphere*, 5(2), pp. 261-270, (2022). https://doi.org/10.31866/2617-796X.5.2.2022.270130
13. Lo, J. J., Chan, Y. C., Yeh, S. W. Designing an adaptive web-based learning system based on students' cognitive styles identified online. *Computers and Educatio*n, 58(1), pp. 209-222, (2012). https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.08.018.

# INTERACTIVE VISUALIZATION OF VECTOR CALCULUS: DEVELOPMENT OF A GAMIFIED EDUCATIONAL APPLICATION

**Tuluchenko H.**[1], **Pershyna Yu.**[1], **Mezhuyev V.**[2]
[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] FH JOANNEUM University of Applied Sciences, Institute of Industrial Management, Kapfenberg, Austria

**Abstract.** The study presents a Python-based software suite (SymPy, ManimCE, PyQt6) designed to enhance vector calculus education in higher engineering schools. The tool addresses student difficulties in visualizing abstract operators through a novel paired modular architecture. This system ensures a closed educational cycle: educators manage parameterized task libraries through a GUI, while students perform active knowledge verification. Correct analytical solutions trigger gamified visual rewards—procedurally generated 3D animations that reveal the physical meaning of divergence, curl, and flux. Pilot testing with engineering students confirmed increased engagement and a deeper conceptual grasp. By eliminating technical programming barriers for teachers, the suite enables the integration of dynamic rendering into the curriculum, transforming passive learning into interactive exploration in the digital educational environment.

**Keywords:** AI-Co-Piloted Engineering, Vector Calculus, Vector Field Visualization, Automated Verification, Cognitive Reward, Manim, SymPy, Procedural Animation, STEM Education.

**Introduction.** The modernization of higher engineering education is inextricably linked to the integration of Information and Communication Technologies (ICT) that can effectively represent abstract mathematical concepts. Vector calculus serves as a fundamental apparatus for mastering core engineering disciplines, including electrodynamics, fluid mechanics, and structural analysis. The complexity of understanding operations such as flux, divergence, and curl demands a high level of spatial reasoning and the ability to operate with multidimensional symbolic structures.

Current trends in STEM education emphasize the transition from passive information reception to active, technology-mediated exploration [1]. Methodologies such as gamification and dynamic visualization, rooted in Paivio's Dual Coding Theory [2], have proven to significantly enhance knowledge retention by stimulating both verbal and visual cognitive channels [3-5]. Within this context, the development of specialized software tools that provide real-time feedback becomes a strategic priority for improving the quality of specialist training in the digital era.

**The purpose of the work** is to develop and implement a Python-based software suite that bridges the gap between abstract symbolic reasoning and spatial visualization in vector calculus through the integration of automated 3D rendering and symbolic computation. The research focuses on creating a specialized modular environment that eliminates technical barriers for educators in content generation while providing students with a gamified tool for active knowledge verification and intuitive exploration of mathematical operators.

**Formulation of the problem.** The current stage of digitalization in STEM education highlights a significant disconnect between the availability of advanced visualization libraries and their practical implementation by domain experts. While vector calculus requires a synergy of abstract symbolic reasoning and spatial intuition, most existing educational tools offer only deterministic, passive content (static diagrams or pre-rendered videos) [6]. This leads to cognitive passivity, where students memorize formulas without a deep grasp of their geometric nature.

A critical barrier is the "technological threshold": mathematics educators often possess innovative pedagogical ideas but lack the professional programming expertise required to build complex interactive software [7]. This gap prevents the creation of tools that provide immediate, personalized feedback, which is essential for transforming a calculated result into a verified conceptual experience.

**Solving the problem.** However, the emergence of Large Language Models (LLMs) as architectural consultants allows educators to shift their role from writing low-level code to strategic design, enabling the independent development of specialized software that bridges the gap between formal algebra and dynamic 3D modeling.

The technical implementation of the proposed software suite is based on a high-level integration of four key Python libraries: PyQt6 for the graphical user interface, SymPy for symbolic mathematics, ManimCE for procedural animation, and NumPy for numerical grid processing.

The system's architecture is designed to support two distinct pedagogical philosophies: universal exploratory tools and structured paired modules.

In both cases, the core logic involves a Symbolic-to-Visual Pipeline:

*Parsing:* The SymPy library parses string inputs into mathematical objects, enabling the computation of derivatives (gradient, divergence, curl) and integrals in symbolic form.

*Verification*: The student's analytical answer is compared with the computed symbolic reference. To ensure stability, the comparison is performed by simplifying the difference between the two expressions (Fig. 1).

*Visualization*: Upon a correct answer, the system triggers a ManimCE sub-process. The dynamic reward is not a pre-rendered video but a procedurally generated scene where the vector field and its operators are rendered based on the specific user-provided parameters (Fig. 2).

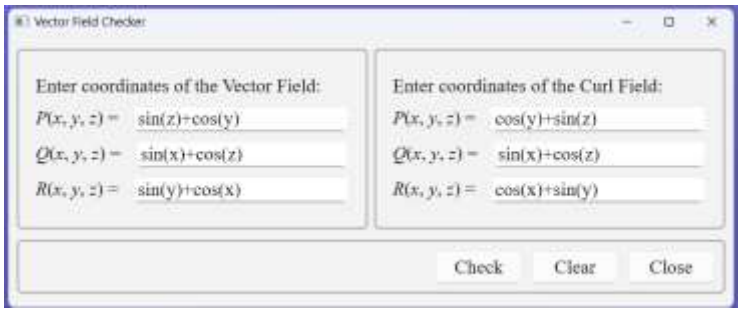



Fig. 1. GUI form for data input in the vector field curl calculation problem




Fig. 2. The success dialog for the vector field curl calculation

For instance, in the Divergence Checker, the "prize" visualization uses color-coded particle flow or density maps to illustrate source/sink behavior (Fig. 3-4).

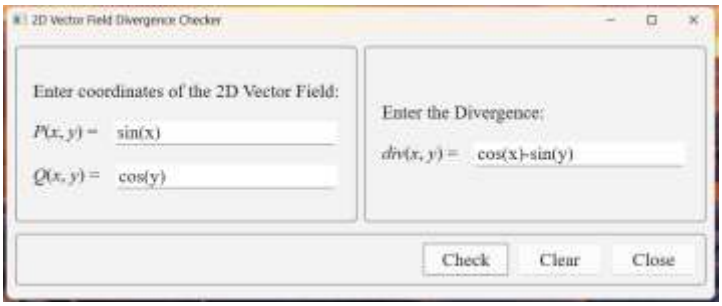



Fig. 3. GUI form for data input in the planar vector field divergence calculation problem

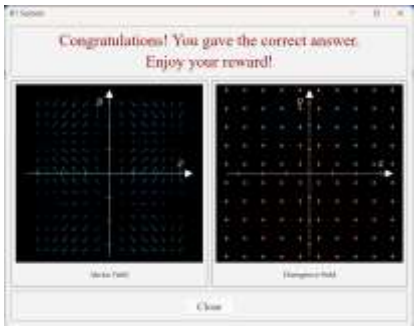



Fig. 4. The success dialog for the 2D divergence calculation

Paired Modules for Structured Learning Cycles address the need for controlled, parameterized testing through Instructor and Student modules. This approach transforms a typical calculation task into a multi-stage interactive experience.

The Instructor Module serves as a content management system. It allows the educator to input problem parameters (e.g., the components of the vector field $\boldsymbol{F}(P, Q, R)$, the integration path, limits of integration, etc.). The module enables the calculation of the problem solution and the generation of corresponding videos. Task variants are stored in a CSV-based library. This eliminates the need for manual verification and ensures the quality of the generated educational content.

The Student Module implements pedagogical scaffolding. Instead of asking for a final numerical answer, the interface requires the student to provide intermediate symbolic components, such as differentials ($dx, dy, dz$) and integrands. This step-by-step verification prevents the "black box" effect and helps students identify specific errors in their analytical reasoning. If an error is detected, the system provides immediate feedback, encouraging a retry. Upon successful completion of all steps, the student receives a cognitive reward that provides additional insights into the solved problem. This visual reward serves as a potent motivator, shifting the student's focus from merely "obtaining a number" to "witnessing a physical process."

**Conclusion.** The developed software suite introduces a novel methodology for studying vector calculus through the integration of symbolic mathematics and dynamic rendering. The combination of PyQt6, SymPy, and ManimCE libraries provides a flexible tool that eliminates technical barriers by enabling educators to generate professional-grade mathematical animations and manage parameterized problem sets through an intuitive graphical interface, without the need for advanced programming skills.

For students, the suite provides topic-specific applications for knowledge verification that offer a far more profound pedagogical experience than generic, standardized testing platforms. By reinforcing correct analytical solutions with immediate visual feedback, the tool transforms routine exercises into an interactive exploration of spatial concepts.

Initial pilot testing with 55 engineering students has confirmed the tool's potential to increase engagement and deepen intuitive understanding of vector calculus concepts, particularly through its gamified visual rewards. Future developments include extending the system with modules for visualizing surface integrals and differential forms, as well as conducting broader pedagogical evaluation in higher mathematics courses for engineering students.

Furthermore, the authors' first-hand experience demonstrates that the successful development of such specialized thematic modules is highly feasible even for those without a professional background in software engineering. The use of Large Language Models (LLMs) proved to be a transformative factor, acting as an intelligent coding partner that translated pedagogical logic into functional Python scripts. This synergy between domain expertise and AI-assisted development establishes a replicable framework for educators to create sophisticated, high-quality digital tools tailored to specific academic challenges.

## References


1. Tuluchenko, H.: Analysis of methodical support for teaching vector analysis and approaches to its improvement. In: Berehova, H. D. (ed.) *Theory and methods of teaching in technical higher education institutions*. pp. 253–277. Knyzhkove vydavnytstvo FOP Vyshemyrskyi V. S., Kherson (2025), [In Ukrainian].
2. Paivio, A.: Mental Representations: A Dual Coding Approach. Oxford: Oxford University Press, (1990).
3. Schoenherr, J., Strohmaier, A. R., Schukajlow, S.: Learning with visualizations helps: A meta-analysis of visualization interventions in mathematics education. *Educational Research Review*, pp. 100639, (2024).
4. Cheong, K. H., Chen, J. S., Kang, K., Yeo, D. J.: Supporting Students' Visualization of Multivariable Calculus Partial Derivatives via Virtual Reality. *Mathematics*, 11(4), pp. 831, (2023).
5. Diaz, A. F., Estoque-Loñez, H.: A Meta-Analysis on the Effectiveness of Gamification on Student Learning Achievement. *International Journal of Education in Mathematics, Science, and Technology*, 12(5), pp. 1236-1253, (2024).
6. 3Blue1Brown.: Divergence and curl: The language of Maxwell's equations, fluid flow, and more. YouTube, [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=rB83DpBJQsE, (2018).
7. Manim Community.: Installation — Manim Community Documentation. [Online]. Available: https://docs.manim.community/en/stable/installation.html, (2025).

# SOME METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING BASIC TRAINING TASKS DURING THE EARLY STAGES OF STUDYING PROGRAMMING IN HIGHER EDUCATION

**Vietrov O.[1], Trofymenko O.[2], Trofymenko V.[1], Hryhorov M.[1]**
[1]Vasyl' Stus Donetsk National University, Vinnytsia, Ukraine
[2]University of Connecticut, Storrs, Connecticut 06269, USA

**Abstract**. The authors examine the methodological problem of applying modeling methods in studying the fundamentals of programming. It is demonstrated how, under changing constraints imposed on a solution algorithm, achieving an acceptable level of efficiency becomes possible only through the construction of an appropriate problem model. Due to the methodological focus of the study, only those mathematical modeling methods accessible to students at the earliest stages of studying programming are considered. The principal methodological recommendations for constructing similar educational examples are formulated.

**Keywords**: Modeling, Algorithms, Branchless Programming, Boolean Algebra, Algebraic Normal Form.

**Introduction**. Studying the fundamentals of programming by students of various specialties has its own specific features. For the Computer Science specialty, it is methodologically insufficient to limit instruction to students' acquisition of basic concepts and algorithmic approaches, as might be expected in other fields of study. Introductory Computer Science courses should be designed in such a way that, from the very beginning of studying programming, students develop into specialists capable of implementing basic practical tasks starting from the earliest stages of their preparation.

Commercial software development is not a well-established academic term but rather an industry-oriented framework for software design, development, and implementation (and, to a lesser extent, a reference point for academic instruction in programming). Sources may include both foundational works such as [1] and [2], as well as carefully developed recommendations by professional software developers, such as [3]. At the same time, it is fair to note that over time even widely recognized approaches [2] may become subject to serious criticism [4], leading to the reconsideration or rejection of principles that were, to some extent, regarded by many as programming classics.

The rapid development of machine learning technologies fundamentally influences both the theoretical and applied foundations of Computer Science, while the profession of software developer itself is undergoing a radical transformation. Some major market participants predict the almost complete replacement of human programming by artificial intelligence systems. These predictions range from openly marketing-oriented statements [5] to more cautious assessments [6]. What all such statements have in common is the recognition that what was previously considered a sufficient standard for training a junior software developer is now clearly inadequate. It is therefore necessary to reconsider the methodology of studying programming fundamentals toward a deeper student understanding of modeling in the design of efficient problem-solving algorithms.

**The purpose of the work** is to demonstrate the possibilities of modeling for developing efficient software solutions when classical approaches fail to produce sufficient results. The authors methodologically analyze an example of using modeling to solve a classical problem under specific constraints imposed on the solution algorithm. In this context, the case of branchless programming is considered. The emphasis is placed specifically on the practical elaboration of the example so that it may subsequently be used as methodological material for instruction.

**Formulation of the problem**. The core ideas of commercial software development can generally be formulated as a set of rather obvious recommendations. If one were to identify a single fundamental recommendation for writing commercial code, it would most likely be the recommendation to write simple code while minimizing unnecessary complexity (it should be noted that "code complexity" is an intuitively understandable yet highly subjective concept). Such an

approach improves code readability and simplifies software maintenance and debugging. Code simplicity may also significantly reduce the probability of errors.

Such recommendations are difficult to dispute when discussing the practical implementation of software products by professionals. However, during the process of studying programming, especially at its earliest stages, the requirement for exceptional code simplicity may have unintended consequences for students. During instruction, we have repeatedly observed situations in which students begin to think exclusively in terms of simple (and, most importantly, ready-made) constructs, thereby losing flexibility and efficiency in software development under certain circumstances. A separate issue concerns computational efficiency: is simple code always optimal from the perspective of performance?

The described approach to programming is highly effective if the goal is to train, within a relatively short period of time, a specialist familiar with a set of basic algorithmic approaches, possessing a strong command of the syntax of a programming language, and capable of effectively solving typical routine problems. These requirements were, until recently, sufficient to obtain a position as a junior software developer. The problem, however, is that precisely such tasks can already be solved by artificial intelligence systems, and with the development of machine learning technologies, such systems will become increasingly effective.

Template-based coding and basic testing skills can no longer be regarded as sufficient in studying programming, even at the earliest stages of instruction. Under conditions of a changing labor market and rapidly developing technologies, there arises a need to prepare junior developers with a much deeper understanding of modeling and algorithmization than is traditionally assumed in introductory programming courses.

It should be clarified that we are not referring to classical Computer Science academic courses such as Algorithms and Data Structures. Such disciplines are typically studied in senior years, and students begin in-depth study of the fundamental aspects of algorithmization already possessing a formed conceptual understanding, relying on approaches to algorithm classification derived from the problem itself, while technically filtering any implementation through the principle of maximum code simplicity. If the constraints imposed on solving a problem differ from conventional classifications, then, according to our experience, students educated within the paradigm described above often find it extremely difficult even to implement an elementary task, not to mention analyzing algorithmic efficiency depending on the selected problem model.

**Solving the problem**. Educational literature on the concept of branchless programming is extremely limited, and, as a rule, the few available sources are focused exclusively on the use of the C++ language [7, 8]. Even at the earliest stages of studying programming, it may be useful to draw essential information on this topic from professional blogs [9] and forums. The choice of C++ is understandable, since it is a strongly CPU-oriented programming language.

The use of the branchless programming concept (together with branch prediction) makes it possible to substantially optimize software code, especially in the development of low-latency, high-performance software.

Following [10], it can be concluded that branchless programming algorithms may be a highly effective solution in the following cases: Hot loops with unpredictable conditions; Cryptographic or timing-sensitive code; SIMD parallel computing technologies where branching kills performance [11].

However, beyond the highly specialized applications of branchless programming described above, this concept may also find relevance in traditional programming practice, since authors often point out that frequent use of branching and, consequently, if–else constructions reduces code readability and complicates refactoring. Such a claim may be considered debatable, as code readability is a highly subjective concept. Other criticisms regarding the use of if–else constructions include the assertion that branching increases the probability of introducing errors, complicates test configuration, and results in test duplication [12].

The requirement to implement a well-known problem using branchless programming approaches makes it possible to demonstrate the potential of mathematical modeling for improving

solution efficiency. Since the issues considered in the present study are of methodological interest, only well-known mathematical methods and concepts accessible to students at the earliest stages of studying programming were employed for modeling purposes.

The study considers basic methods of algebraic modeling, such as constructing a characteristic multilinear function of three variables from a value table. The fundamental principles of Boolean algebra were applied (including the theory of Zhegalkin polynomials) in the context of their practical application to programming problems. In particular, based on the problem conditions, the applied methods of Boolean algebra were extended to the case where the polynomial arguments are Boolean variables, while the corresponding coefficients and function values are natural numbers.

Particular attention is devoted to the application of bitwise operations, both for optimizing previously obtained models and for constructing independent algorithms based on the use of bit masks.

Using the described principles of applied modeling, students will easily obtain formulas for calculating the octant number based on the given coordinates of a point

$$octant_1(x,y,z) = 5 - (x>0) + (y>0) - 3\cdot(z>0) + 2\cdot(x>0)\cdot \\ \cdot\big((y>0)\cdot(z<0) + (y<0)\cdot(z>0)\big) + 2\cdot(y>0)\cdot(z>0),$$

$$octant_2(x,y,z) = 5 \text{ ^ } (x>0) \text{ ^ } 3\cdot(y>0) \text{ ^ } 7\cdot(z>0).$$

The formulas above are written in a syntax similar to Python's. Logical expressions $t>0$ ($t<0$) return True or False, which are interpreted in the formulas as the numeric values 1 or 0.

The multilinear function of three variables, $octant_1$, represents an algebraic model, while the $octant_2$ function represents a model based on bitwise operations (specifically, the XOR operation).

The computational efficiency of both functions can be improved by replacing the algebraic multiplication operation with the logical AND operation

$$octant_1(x,y,z) = 5 - (x>0) + (y>0) - (z>0)\ and\ 3 + (x>0)\ and \\ and\ \big((y>0)\ and\ (z<0) + (y<0)\ and\ (z>0)\big) and\ 2 + (y>0)\ and\ (z>0)\ and\ 2,$$

$$octant_2(x,y,z) = 5 \text{ ^ } (x>0) \text{ ^ } (y>0)\ and\ 3 \text{ ^ } (z>0)\ and\ 7.$$

In this case, $octant_1$ and $octant_2$ are already completely consistent with Python syntax. In this case, code optimization is based on the principle of lazy evaluation.

Finally, modeling techniques leading to a simplified understanding of the concept of finite-state machines were demonstrated. This was done with the aim of illustrating approaches to more flexible use of data structures in programming languages, particularly in Python.

The following code demonstrates how, using our example octant-problem and basic Python data structures, we can demonstrate the practical use of such a rather complex concept as finite state machines:

```
oct_dict = {0 : (7, 0), 3 : (6, 1), 4 : (5, 2), 7 : (4, 3)}
oct_dict[oct_dict[oct_dict[0][x>0]][y>0]][z>0]
```

In accordance with the stated purpose of the study, the principal recommendations for constructing educational examples of modeling in solving typical problems were formulated.

First, the problem under consideration should be elementary both in its formulation and in its classical, that is, most obvious solution. The introduced concepts should function as additional tools rather than the only available means of solving the problem for students.

Second, the logical coherence of presentation should be preserved. A mere enumeration of different approaches to constructing a problem model undoubtedly possesses methodological value; however, it is less practical than identifying a direct and inseparable relationship between changes in the problem modeling approach and changes in the requirements imposed on the algorithm.

Third, within the context of the methodological objectives considered in this study, the introduced concepts should be as simple and intuitive for students as possible, especially when encountered for the first time during instruction. At this stage, formal mathematical justification may reasonably be neglected (to the extent possible). It is precisely the simplicity of the proposed

mathematical concepts and even their apparent obviousness following appropriate explanation by the instructor that will later contribute to the development of a “recognition effect” among students, forming an intuitive foundation of understanding that will enable more effective mastery of these concepts when they are studied systematically and with the necessary academic rigor.

**Conclusion**. Drawing upon their experience in teaching programming, the authors have presented a fragment of a methodology for a practical introduction to the topic of branchless programming, including both heuristic modeling methods and the application of Boolean algebra techniques at a basic level accessible to all Computer Science students during the initial stages of studying programming.

A typical exercise aimed at practicing the standard skill of constructing conditional branching statements has been reconceptualized by the authors as a creative task, the purpose of which is to broaden students’ understanding of the possibilities offered by relatively simple mathematical modeling techniques for constructing new solution algorithms for a classical problem under modified implementation constraints. In this case, it is precisely the need to improve algorithmic efficiency that leads to a radical reconsideration of the problem model.

The authors place emphasis on methods and concepts that, as a rule, receive only superficial attention during the early stages of studying programming (if they are considered at all). In the present work, such concepts include branchless programming and the practical application of Boolean algebra as one of the modeling techniques for improving the efficiency of problem-solving algorithms.

The depth and persistence of such an effect require further study.

## References


1. Thomas, D., Hunt, A.: The Pragmatic Programmer: Your Journey To Mastery. 2nd Edition, Addison-Wesley Professional, 352 p., (2019)
2. Robert C. Martin: Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship. 1st Edition, Pearson, 464 p., (2008)
3. Hamid Mosalla: Programming Principles: A Summary https://hamidmosalla.com/2024/02/10/programming-principles-a-summary/ (2024)
4. Casey Muratori: cleancodeqa.md https://github.com/unclebob/cmuratori-discussion/blob/main/cleancodeqa.md (2023)
5. Kwan Wei Kevin Tan: Anthropic's CEO Says That In 3 To 6 Months, AI Will Be Writing 90% Of The Code Software Developers Were In Charge. Business Insider, https://www.businessinsider.com/anthropic-ceo-ai-90-percent-code-3-to-6-months-2025-3 (2025)
6. Shubhangi Goel: OpenAI's President Says AI Has Gone From Writing 20% To '80% Of Your Code', Business Insider, https://www.businessinsider.com/openai-president-ai-now-writing-80-percent-of-code-2026-5 (2026)
7. David Spuler: C++ Low Latency: Multithreading And Hotpath Optimizations (Advanced C++ Programming), Independently published< 302 p., (2025)
8. Fedor G. Pikus: The Art of Writing Efficient Programs, Packt Publishing, 464 p., (2021)
9. Branchless Programming −Why Your CPU Will Thank You https://www.joberty.com/blog/branchless-programming-why-your-cpu-will-thank-you/ (2023)
10. THE WEIRD CONCEPT OF 'BRANCHLESS PROGRAMMING https://sanixdk.xyz/blogs/the-weird-concept-of-branchless-programming (2025)
11. Milan Todorov: Writing Branchless Code https://mlntdrv.medium.com/writing-branchless-code-a319b1b89ae0 (2022)
12. Mastripolito, B., Koskelo, N., Weatherred, D., Pimentel, D., Sheppard, D., Graham, A., Monroe, L., Robey, R.: SIMD-Optimized Search Over Sorted Data, *Computing and Information Science in Engineering*, 22(2): 021009, JCISE-20-1341 https://doi.org/10.1115/1.4052728

# OPEN DIGITAL INCLUSIVE EDUCATIONAL ECOSYSTEM OF UNIVERSITY: CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ENSURING CONTINUITY OF HIGHER EDUCATION IN UKRAINE

**Yatsenko R., Pushkar O.**
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine

**Abstract**. This paper presents the conceptual framework and terminological apparatus for the Open Digital Inclusive Educational Ecosystem of the University (ODIEE). The research addresses the persistent problem of digital fragmentation in Ukrainian higher education institutions (HEIs), critically exacerbated by the COVID-19 pandemic and the ongoing full-scale war in Ukraine. The paper proposes a formal definition of ODIEE as a service-oriented, scalable, and interoperable high-technology environment built on open standards and Universal Design for Learning (UDL) principles, integrating four key components: people, content, technologies, and data. A comparative analysis contrasts the fragmented instrumental approach with the holistic ecosystem approach. A five-level HEI digital ecosystem maturity model is proposed, providing a diagnostic and goal-setting framework for Ukrainian universities.

**Keywords**: digital educational ecosystem, inclusive education, open educational resources, Universal Design for Learning, learning analytics, service-oriented architecture, educational continuity.

**Introduction**. Research by Morze et al. (2023), comparing universities in Ukraine, Poland, and Slovakia, demonstrated that institutions with higher levels of digital service integration showed significantly greater resilience during pandemic-related disruptions than those relying on isolated software solutions [4, 3]. This fragmented condition, aptly termed *"digital patchwork"*, defines the current state of most Ukrainian HEIs [4, 2; 10]. Xalxo et al. (2025) similarly emphasize that tool isolation is a primary driver of educational quality decline in online environments [10]. Singh and Singh (2024) further argue that sustainable digital education is possible only through the convergence of inclusion, accessibility, and institutional transformation [8, 1].

The transition from isolated tools to a unified, human-centered architecture constitutes not merely a technological update but a fundamental paradigm shift across organizational, didactic, and managerial dimensions [1, 107; 2, 1; 11].

**The purpose of the work** is to develop the conceptual framework and terminological apparatus for the Open Digital Inclusive Educational Ecosystem of the University (ODIEE), capable of ensuring educational continuity, inclusivity, and digital maturity in Ukrainian HEIs, with primary application to S. Kuznets KhNUE.

**Formulation of the problem**. Most Ukrainian HEIs currently function at Level 2–3 of digital maturity: centralized LMS deployment and basic electronic records management exist, but systemic integration, interoperability, and inclusive design remain absent [4, 8]. The core problem is the lack of a coherent conceptual and architectural model to guide the transition from fragmented digitalization toward a fully integrated, inclusive, and resilient digital ecosystem. This gap is especially critical in the wartime context, where educational continuity requirements are immediate and non-negotiable.

**Solving the problem**. Based on a systematic analysis of international sources [1–11] and benchmarking of global digital learning ecosystem models, the following definition of ODIEE is proposed:

*Open Digital Inclusive Educational Ecosystem of the University* (ODIEE, "VICE-Univers") – is a service-oriented, scalable, and interoperable high-technology environment of a HEI, built on open standards and Universal Design for Learning (UDL) principles, which coherently integrates educational, scientific, and administrative digital resources to ensure continuous, adaptive, student-centered learning and equal access for a broad spectrum of learners, including veterans, internally displaced persons (IDPs), and persons with special educational needs [3, 1; 4, 3; 5, 1; 6, 601].

The ecosystem integrates four key components: (1) *People* – students, academic staff, administrators, and external stakeholders; (2) *Content* – open educational resources (OER), interactive and immersive materials, research outputs; (3) *Technologies* – LMS core, microservices,

API interfaces, AI modules, adaptive learning systems; (4) *Data* – learning analytics, e-portfolios, student digital traces, and quality monitoring dashboards.

A key property of ODIEE is *systemic openness*: unlike a closed corporate portal, it exchanges information, resources, and data with the external environment – integrating with national systems (EDBO), international platforms (Coursera, edX, OpenBadges), and exporting verifiable micro-credentials and Open Badges [3, 2; 5, 3; 7, 955].

A comparative analysis of the instrumental and ecosystem approaches to HEI digitalization reveals fundamental differences across six dimensions:

Table 1

**Comparison of instrumental and ecosystem approaches to HEI digitalization**

(developed by the author based on [1; 3; 4; 10])

| Criterion | Instrumental Approach | Ecosystem Approach |
|---|---|---|
| Architecture | Isolated products; no shared data bus | SOA with API Gateway and unified data bus |
| Data exchange | Manual or absent; data duplication | Automatic via open protocols (LTI, xAPI) |
| Inclusivity | Fragmented; tool-dependent | Systemic; built-in via UDL and WCAG |
| Scalability | Limited; each tool requires separate deployment | Modular; microservices added without changing core |
| Analytics | Sited per platform | Unified Learning Analytics with cross-platform data collection |
| Management | Reactive, situational | Data-Driven; proactive via analytical dashboards |

Drawing on digital maturity frameworks [1; 4; 9], a five-level scale for HEI digital ecosystem development is proposed (Table 2). Most Ukrainian HEIs currently operate at Levels 2–3 [4, 8]. This research provides the theoretical and practical foundation for the transition to Levels 4–5.

Table 2

**Levels of HEI digital ecosystem maturity**

(developed by the author based on [1; 4; 9])

| Level | Name | Characteristics | Tools |
|---|---|---|---|
| 1 | Initial (Ad hoc) | Individual faculty initiatives; no strategy | Google Classroom, Telegram |
| 2 | Basic (Managed) | Centralized LMS; electronic registrar | Moodle, corporate e-mail |
| 3 | Integrated (Defined) | LMS-registrar integration; SSO; basic analytics | LMS + e-library + SSO |
| 4 | Optimized (Quantitatively Managed) | Cross-platform analytics; adaptive learning; UDL | SOA; xAPI; AI modules |
| 5 | Ecosystem (Optimizing) | Full ODIEE: openness, interoperability, self-regulation | ODIEE |

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics represents an optimal implementation site for "VICE-Univers" for four reasons: (a) strong IT competence concentrated in the Institute of Information Technologies, with expertise in software development, AI, and data analytics; (b) existing digital infrastructure (Moodle LMS, electronic dean's office) constituting a Level 3 baseline for integration; (c) a significant proportion of veteran, moved students creating genuine and immediate demand for inclusive design; and (d) front-line city operational experience generating empirical evidence for resilience-focused architectural requirements [11, 5]. The ODIEE concept is thus designed not as an abstract model but as an architecture suitable for phased deployment, with scalability potential for other Ukrainian universities.

**Conclusion**. This paper establishes the conceptual and terminological foundation for the Open Digital Inclusive Educational Ecosystem of the University, yielding the following principal outcomes:

1. The necessity of transitioning from fragmented "digital patchwork" to ecosystem-level digitalization is substantiated through comparative analysis of international sources and cross-country benchmarking.

2. A formal definition of ODIEE is proposed, integrating four components (people, content, technologies, data) through service-oriented architecture, open protocols (LTI, xAPI), and UDL-based inclusive design.

3. A five-level digital ecosystem maturity model provides a diagnostic and strategic goal-setting framework for Ukrainian HEIs, with most currently at Levels 2–3 and the target being Level 5.

4. The ODIEE architecture constitutes a blueprint for the resilient, inclusive, and internationally integrated Ukrainian university of the future – flexible under external crises, open to international integration, and unconditionally accessible to every learner.

## References


1. Anvari R., Moradi F., Shirvani A. Digital Learning Ecosystem at Educational Institutions: A 4-University Perspective. *Professional Studies: Theory and Practice*, 2024. DOI: 10.56131/pstp.2024.28.1.275.
2. Bobro N. Modeling the Educational and Economic Ecosystem of the Digital University in the Context of Intellectual Capital Formation. *Economic Synergy*, 2025. DOI: 10.53920/es-2025-2-1.
3. Lane D. C., Goode C. Open For All: The OERu's Next Generation Digital Learning Ecosystem. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 2021. DOI: 10.19173/irrodl.v23i1.5763.
4. Morze N., Smyrnova-Trybulska E., Drlík M., Buinytska O. Development of advanced digital ecosystems at universities: A study comparing experiences from Ukraine, Poland and Slovakia. *European Journal of Education*, 2023. DOI: 10.1111/ejed.12588.
5. Ortega M. X. P. et al. Learning Ecosystem: Designing An Inclusive Space to Enhance the Higher Education Process. *International Journal of Changes in Education*, 2025. DOI: 10.47852/bonviewijce52024054.
6. Salvador V. F. M. et al. A Smart Ecosystem for Learning and Inclusion: An Architectural Overview. *ICCSA 2020*, vol. 12249, pp. 601–616. DOI: 10.1007/978-3-030-58799-4_44.
7. Sigalov S. E., Cohen A., Nachmias R. Transforming higher education: a decade of integrating Wikipedia and Wikidata for literacy enhancement and social impact. *Journal of Computers in Education*, 2024, vol. 12, pp. 953–995. DOI: 10.1007/s40692-024-00334-x.
8. Singh R. K., Singh A. Building Sustainable Digital Education in India: Transformation through Equity, Inclusion and Accessibility. *SOSHUM: Jurnal Sosial dan Humaniora*, 2024. DOI: 10.31940/soshum.v14i1.54-62.
9. Smah S. O. The Construction of Effective Learning Ecosystems in Open and Distance Learning (ODL) Universities: Technologies, Institutional Preparedness, and Change. *Journal of Research and Innovation in Open and Distance Learning*, 2023. DOI: 10.33830/jriodl.v2i1.4923.
10. Xalxo P. et al. Online Education Ecosystem: Challenges and Opportunities. *Journal of Educational Technology and Online Learning*, 2025. DOI: 10.1111/ejed.70085.
11. Zhao Y., Yang J. Strategies for Optimizing Digitally Compatible Educational Ecosystems. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, 2024. 10.1371/journal.pone.0302285.

# ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ У ПРАКТИЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ: ДОСВІД, МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

**Ганжеєв Д.І.[1], Іванченко Д.А.[1], Клецька О.В.[1,2], Шикаловський Д.В.[1], Фалендиш А.П.[2]**
[1]ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна
[2]Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

**Анотація.** У роботі узагальнено досвід застосування хмарних, обчислювальних та аналітичних цифрових інструментів під час проведення практичних і лабораторних занять з профільних дисциплін кафедри «Автомобільний транспорт» ДВНЗ «ПДТУ». Описано методичні підходи до використання Google Classroom, Google Meet, Google Forms, MATLAB/Simulink, GNU Octave, Microsoft Excel, бібліотек Python, HTML-візуалізацій та NotebookLM. Проаналізовано можливості та ризики застосування студентами генеративного штучного інтелекту, наведено ознаки виявлення AI-генерованих робіт і запропоновано заходи контролю. Обґрунтовано ефективність змішаного навчання в умовах воєнного часу.

**Ключові слова**: цифрові інструменти, дистанційне навчання, змішане навчання, програмне забезпечення, Google Classroom, Google Meet, MATLAB, Python, штучний інтелект, академічна доброчесність, транспортні технології.

# DIGITAL TOOLS IN PRACTICAL TRAINING OF TRANSPORT ENGINEERING STUDENTS: EXPERIENCE, OPPORTUNITIES AND AI RISKS

**Ganzheev D.[1], Ivanchenko D.[1], Kletska O.[1,2], Shykalovskyi D.[1], Falendish A.[2]**
[1]Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine
[2]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**Abstract.** The paper summarises the experience of applying cloud, computational and analytical digital tools in practical and laboratory classes within transport engineering disciplines at PSTU. Methodological approaches to using Google Classroom, Google Meet, Google Forms, MATLAB/Simulink, GNU Octave, Microsoft Excel, Python libraries, HTML visualisations, and NotebookLM are described. The opportunities and risks of students' use of generative AI are analysed, indicators of AI-generated submissions are identified, and control measures are proposed. The effectiveness of blended learning under wartime conditions is substantiated.

**Keywords:** digital tools, blended learning, Google Classroom, Google Meet, MATLAB, Python, artificial intelligence, academic integrity, transport technologies.

**Вступ.** Стрімка цифровізація вищої освіти, прискорена умовами пандемії COVID-19 та повномасштабного вторгнення в Україну, висунула перед викладачами технічних спеціальностей нові педагогічні виклики. Кафедра «Автомобільний транспорт» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ПДТУ) функціонує у дистанційному режимі з 2022 року, що унеможливлює традиційний доступ студентів до лабораторного обладнання. За цих умов цифрові інструменти стають основним засобом забезпечення практичної компоненти підготовки майбутніх фахівців з транспортних технологій [1].

Разом із тим педагогічна спільнота стикається з принципово новою проблемою – масовим та безрефлексивним використанням студентами засобів генеративного штучного інтелекту (ШІ). Це ставить під загрозу якість засвоєння знань і підриває академічну доброчесність навчального процесу. Тому осмислення накопиченого досвіду та вироблення обґрунтованих педагогічних стратегій є актуальним завданням сучасної вищої школи.

**Метою роботи** є узагальнення досвіду застосування цифрових інструментів у практичній підготовці студентів транспортних спеціальностей, оцінка їх потенціалу та розробка підходів до виявлення й контролю використання студентами засобів генеративного ШІ.

**Постановка та розв'язання проблеми.** Основу дистанційної взаємодії зі студентами складає екосистема Google Workspace. Google Classroom виконує функцію єдиного навчального середовища: тут розміщено лекційний матеріал, методичні рекомендації до практичних занять, інструкції до лабораторних робіт, завдання на самостійну роботу, здійснюється збір і рецензування виконаних робіт. Прозора хронологія подачі дозволяє відстежувати час виконання роботи, що є непрямим індикатором академічної доброчесності.

Google Meet є основним інструментом для проведення лекцій із демонстрацією презентаційних слайдів, а також забезпечує синхронний формат проведення практичних і лабораторних занять: ведення розрахунків у реальному часі, спільне обговорення результатів, усне опитування. Принципово важливим є поєднання двох режимів: навчально-демонстраційного (викладач виконує завдання з коментарями) та захисного (студент демонструє власний результат і відповідає на питання по суті). Другий режим є головним засобом верифікації розуміння [2].

Google Forms використовуються для вхідного та вихідного контролю знань, зокрема з автоматичною перевіркою відповідей, а також для збору зворотного зв'язку від студентів щодо пройденого курсу. Важливою перевагою є можливість рандомізації варіантів запитань, що знижує ймовірність копіювання.

Microsoft Excel залишається найбільш доступним і затребуваним обчислювальним середовищем. Наприклад, у курсі «Експлуатаційні властивості АТЗ» студенти будують тягово-динамічну характеристику транспортного засобу та аналізують гальмівну динаміку, використовуючи його розрахункові функції та інструменти побудови графіків. Перевагою Excel є прозорість покрокового виконання роботи і складність «підміни» результату.

MATLAB/Simulink використовується у дисциплінах «Моделювання транспортних процесів» та «Інтелектуалізація транспортних технологій» для моделювання динаміки транспортних потоків, аналізу навантажень на вузли вулично-дорожньої мережі (ВДМ) та реалізації елементів теорії графів. Simulink як середовище блокового моделювання дозволяє студентам будувати структурно-функціональні моделі транспортних систем без необхідності глибокого знання програмування. Чудовою альтернативо, яка використовує мову MATLAB, але не потребує ліцензування, є GNU Octave.

Бібліотеки Python (NumPy, Pandas, Matplotlib, NetworkX) застосовуються для більш складних аналітичних задач. У курсі «Засоби автотранспортних і термінальних технологій» тестувалася можливість планування складських операцій та побудови аналітичних звітів за допомогою Python. На дисципліні «Організація дорожнього руху» як приклад демонструвалася Python-модель, де транспортний потік візуалізувався як клітинний автомат – група студентів спостерігала анімовану динаміку щільності та швидкості руху на сегменті дороги, що забезпечило вищий рівень розуміння порівняно з традиційним описом. Середовищем запуску виступає Spyder IDE або командний рядок – варіативність дозволяє охопити різні платформи, а отже і різні технічні можливості студентів.

HTML-інструменти застосовуються там, де стандартні обчислювальні середовища поступаються інтерактивності. Зокрема, у дисципліні «Засоби автотранспортних і термінальних технологій» студенти реалізують задачу укладання вантажу на палету або у контейнер у вигляді інтерактивної HTML-сторінки з відображенням схеми розміщення у браузері. Це формує компетентності базового веб-програмування та просторового мислення, а наочність результату мотивує до ретельнішого виконання.

NotebookLM (Google) використовується для роботи з науковими джерелами, зокрема іноземними: студенти завантажують pdf-статті та методичні матеріали, задають уточнюючі питання в межах завантажених документів. Це принципово відрізняється прямого звернення до нейромережі, оскільки відповіді прив'язані до конкретного джерела і перевіряються посиланнями. NotebookLM є прикладом відповідального використання ШІ в академічному контексті [3].

Доступність генеративних ШІ-систем (ChatGPT, Gemini, Copilot тощо) спричинила нову педагогічну проблему: студенти дедалі частіше не виконують, а «замовляють»

практичні та лабораторні роботи. При цьому вони нерідко не перевіряють отриманий результат, надаючи текст із очевидними ознаками генерації.

Серед характерних індикаторів AI-генерованих робіт виявлено:

- сервісні повідомлення ШІ, залишені у тексті;
- надто складна або невідповідна контексту термінологія;
- надмірне спрощення стилю у виправлених роботах при вказівці на помилку;
- формули, оформлені як растрові зображення або як простий текст, нерідко – із хибними символами;
- неправильне розшифрування вузько вживаних абревіатур;
- надмірно ритмічний або симетричний текст, відсутність граматичних і друкарських помилок;
- надмірне вживання конструкцій «не ..., а ...», «варто зазначити» і т.п.;
- надмірна кількість підзаголовків і списків, у тому числі багаторівневих;
- списки літературних джерел з неіснуючими назвами, авторами і т.п.

Мабуть, найдієвішим педагогічним засобом контролю залишається усне опитування під час захисту роботи. Студент, що не виконував завдання самостійно, як правило, не може пояснити логіку розрахунку, відповісти на питання «чому саме такий результат?» або відтворити частину обчислень в іншому варіанті.

Окрім виявлення, необхідна превентивна стратегія – проектування завдань, стійких до ШІ-генерації. До таких відносяться завдання з індивідуальними числовими варіантами, що прив’язані до реальних транспортних об’єктів; завдання, де результат суперечить «типовій» відповіді ШІ (нестандартні граничні умови); завдання з обов’язковою покроковою роботою в Excel або інших програмах, де процес важливіший за кінцевий результат [4].

Позиція авторів полягає в тому, що ШІ є потужним і корисним інструментом; він не має бути повністю заборонений до використання студентами. Однак, у сучасному контексті, особливо в реаліях дистанційного навчання, він не повинен замінювати власне мислення студента. Завдання педагога – навчити відповідальній взаємодії з ШІ: верифікувати результати, розуміти обмеження, відповідати за якість кінцевого продукту.

**Висновок.** Набутий досвід свідчить, що системне застосування цифрових інструментів у практичній підготовці студентів транспортних спеціальностей дозволяє ефективно компенсувати дефіцит аудиторного часу та лабораторного обладнання, неминучий в умовах воєнного часу. Поєднання Google Classroom/Meet, Excel, MATLAB, Python та HTML-інструментів забезпечує охоплення різних рівнів пізнавальної діяльності – від базових обчислень до моделювання складних транспортних систем.

Водночас масове використання генеративного ШІ студентами потребує як превентивного проектування завдань, так і розвитку педагогічних компетентностей викладача щодо діагностики AI-генерованого контенту. Перспективами подальших досліджень є кількісна оцінка впливу запропонованих підходів на рівень засвоєння матеріалу та розробка верифікованого переліку діагностичних ознак використання ШІ.

## Список використаних джерел


1. Биков В. Ю., Лещенко М. П. Цифрова гуманістична педагогіка відкритої освіти. *Теорія і практика управління соціальними системами*. 2016. № 4. С. 115–130.
2. Модернізація освіти в цифровому вимірі : монографія / за наук. ред. Н. В. Морзе, О. П. Буйницької. Київ : Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2021. 300 с.
3. Cotton D. R. E., Cotton P. A., Shipway J. R. Chatting and cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. *Innovations in Education and Teaching International*. 2024. Vol. 61, No. 2. P. 228–239.
4. Lim Weng Marc, Gunasekara A., Pallant J. L., Pallant J. l., Pechenkina E. Generative AI and the future of education: Ragnarök or reformation? A paradoxical perspective from management educators. *The International Journal of Management Education*. 2023. Vol. 21, Iss. 2. P. 1–24.

# ІНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГІЇ У ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ІНФОРМАТИКИ: СУЧАСНІ ЗАКОРДОННІ ПІДХОДИ Й ТЕНДЕНЦІЇ

**Душенко О.С.**
Ізмаїльський державний гуманітарний університет, Ізмаїл, Україна

**Анотація.** Швидкий розвиток інтернет-технологій вимагає оновлення освітніх курсів, про що свідчить аналіз закордонних підходів. Описано сучасні закордонні підходи й тенденції у контексті використання інтернет-технологій: важливість інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), у тому числі інтернет-технологій, для освіти; необхідність формування ІКТ-компетентності вчителів як елементу розвитку освіти; використання вебмікронавчання як інноваційного методу навчання; виконання групових проєктів на заняттях; використання доповненої реальності, гейміфікації та серйозних ігор; необхідність змінення навчальних програм підготовки майбутніх учителів. Зроблено висновок про важливість вивчення інтернет-технологій майбутніми вчителями інформатики в умовах появи нових інтернет-технологій, адаптації змісту та організації курсу «Інтернет-технології та ресурси» відповідно до існуючих реалій.

**Ключові слова:** професійна підготовка майбутніх учителів інформатики, інтернет-технології, вебмікронавчання, групові проєкти, оновлення навчальних програм.

# INTERNET TECHNOLOGIES IN THE PROFESSIONAL TRAINING OF FUTURE COMPUTER SCIENCE TEACHERS: MODERN INTERNATIONAL APPROACHES AND TRENDS

**Dushchenko O.S.**
Izmail State University of Humanities, Izmail, Ukraine

**Abstract.** The rapid development of Internet technologies requires updating educational courses, as evidenced by the analysis of foreign approaches. Modern foreign approaches and trends in the context of the use of Internet technologies are described: the importance of information and communication technologies (ICT), including Internet technologies, for education; the need to form ICT competence of teachers as an element of educational development; the use of web microlearning as an innovative teaching method; carrying out group projects in class; the use of augmented reality, gamification and serious games; the need to change the curricula for training future teachers. The conclusion is made about the importance of studying Internet technologies by future computer science teachers in the context of the emergence of new Internet technologies, adapting the content and organization of the course "Internet Technologies and Resources" in accordance with existing realities.

**Keywords:** professional training of future computer science teachers, Internet technologies, web microlearning, group projects, updating curricula.

Дослідження інтернет-технологій у контексті професійної підготовки майбутніх учителів інформатики свідчить про безперервний розвиток та важливість інтернет-технологій в освітньому процесі. У 2026 році інтернет-технології продовжують активно розвиватися та використовуватися в освіті. Інтернет-технології й надалі будуть зберігати важливе місце в реалізації освітнього процесу. Тому й знання інтернет-технологій та вміння їх використовувати продовжують залишатися важливими у підготовці майбутніх учителів інформатики.

Інтернет-технології й надалі залишаються предметом наукових досліджень, зокрема L. Marquez-Baldo, N. Orellana, G. Almerich, S.-R. Jesus, L. Tomczyk, A. Szymkowiak, B. Melovic, M. Dabic, K. Jeganathan, G. S. Kundi, R. Carvalho, C. Santos, F. Ramos, N. Sugihartini, H. Elmunsyah, D. Nurhadi, Y. Rahmawati, A. Yadav, C. Connolly, M. Berges, C. Chytas, C. Franklin, R. Hijon-Neira, V. Macann, L. Margulieux, A. Ottenbreit-Leftwich, J.R. Warner, C. Brom, A. Drobna, A. Yaghobova, D. Stastny, K. Zabrodska, M. Urban та ін. Незважаючи на увагу вчених до використання інтернет-технологій в освіті, вважаємо

доречним розглянути існуючі закордонні підходи й тенденції до підготовки майбутніх учителів інформатики у контексті вивчення інтернет-технологій.

Аналіз наукових джерел свідчить про такі підходи й тенденції:

**1. Значення ІКТ, у тому числі інтернет-технологій, для освіти.** Учені (A. Szymkowiak, B. Melovic, M. Dabic, K. Jeganathan, G. S. Kundi) розглядають інтернет як «джерело розширення горизонтів», оскільки «мережа забезпечує швидкий доступ до інформаційних технологій у багатьох галузях» [6]. Дослідники роблять акцент на моделях інтернет-освіти, які передбачають використання: YouTube EDU, iTunes U [1]. Нові можливості для педагогічних інновацій відкривають імерсивні вебсередовища, які об'єднують у собі віртуальну, доповнену та змішану реальності [2].

**2. ІКТ-компетентності вчителів як елемент розвитку освіти.** На думку дослідників (A. Szymkowiak, B. Melovic, M. Dabic, K. Jeganathan, G. S. Kundi), вирішальним елементом розвитку освіти є ІКТ-компетентність учителів. Особливо через «впровадження нових технологічних рішень» в освітній процес з метою підвищення мотивації учнів до «використання технологій та інтернету як інструментів навчання» [6]. Учений C.M. Whitmore розглядає ІКТ як програмне та апаратне забезпечення, «яке використовують студенти або викладачі для забезпечення навчання в класі» [9]. Інші вчені (L. Marquez-Baldo, N. Orellana, G. Almerich, S.-R. Jesus) зазначають, що позитивне ставлення вчителів до інтеграції ІКТ «сприяє впровадженню технологічних ресурсів у педагогічну практику» [4]. Автори (C. Brom, A. Drobna, A. Yaghobova, D. Stastny, K. Zabrodska, M. Urban) проводили дослідження щодо розуміння принципів інтернету серед молодих викладачів інформатики та зробили висновок про «необхідність цілеспрямованих втручань для покращення розуміння новими вчителями комп'ютерних наук принципів інтернету, особливо невидимих аспектів, таких як механізми зберігання та передачі даних» [1].

**3. Вебмікронавчання як інноваційний метод навчання.** Модель вебмікронавчання (за N. Sugihartini, H. Elmunsyah, D. Nurhadi, Y. Rahmawati) виступає як «інновація, яка забезпечує більш інтенсивний та структурований практичний досвід, використовуючи вебтехнології як основний засіб»; «… ефективно покращує педагогічні навички майбутніх учителів інформатики, особливо в плануванні уроків та відпрацюванні базових педагогічних навичок» [5]. Таке вебмікронавчання забезпечує отримання майбутнім учителям доступу до «матеріалів, вправ та зворотного зв'язку», що сформує педагогічну майстерність швидше [5].

**4. Виконання групових проєктів на заняттях.** Дослідники (M. Uhanova, N. Prokofyeva, S. Katalnikova, V. Ziborova) стверджують, що використання групових проєктів на заняттях, наприклад, з курсів «Алгоритмізація та програмування рішень» та «Розробка вебдодатків для інтернету», сприяє підвищенню мотивації студентів до навчання, зацікавленості «у підвищенні власної професійної компетентності», якості освіти студентів [8, с. 1408]. Автори описують враження студентів-інформатиків щодо переваг та недоліків використання групових проєктів на заняттях. Так, до переваг такого використання студенти-інформатики відносять: покращення комунікативних навичок та навичок роботи в групі, навичок програмування та дизайну, підвищення зацікавленості та пізнавальності [8, с. 1414]. Недоліками виступають: нестача часу на «виконання групових завдань, відмова деяких членів групи виконувати свою частину завдання, а також труднощі з пошуком та місця для роботи в команді» [8, с. 1414].

**5. Використання доповненої реальності, гейміфікації та серйозних ігор.** Учені (G. Lampropoulos, E. Keramopoulos, K. Diamantaras, G. Evangelidis) наголошують, що поєднання доповненої реальності, гейміфікації та серйозних ігор «може призвести до створення інклюзивного та інтерактивного навчального середовища» [3]. Таке середовище, на думку дослідників, підвищує рівень знань, результатів навчання та мотивації, сприяє розвитку когнітивних та соціально-емоційних навичок, обчислювального та критичного мислення тощо [3].

**6. Необхідність змінення навчальних програм підготовки майбутніх учителів.** Дослідник L. Tomczyk відзначає необхідність змінення навчальних програм майбутніх

учителів у таких сферах: «створення, пошук та управління цифровим контентом, інтеграція ІКТ у зміст предметів, розвиток м'яких навичок, підвищення інтерактивності в класі, соціальні аспекти ІКТ, дистанційне навчання, нові соціально-технічні процеси, розширені цифрові компетентності, прогнозне навчання, аналіз впливу ІКТ на життя людини, захист даних, електронні ризики, низькі цифрові компетентності, розуміння медіа-повідомлень та підтримка людей із інвалідністю» [7]. Наприклад, учені (A. Yadav, C. Connolly, M. Berges, C. Chytas, C. Franklin, R. Hijon-Neira, V. Macann, L. Margulieux, A. Ottenbreit-Leftwich, J.R. Warner) констатують факт оновлення та перегляду типової навчальної програми з інформатики. Було додано вивчення «інтернет речей» та «квантові обчислення», але переглянуто та оновлено за потреби: «обчислювальні системи, мережі та інтернет, дані та аналіз, кібербезпека, штучний інтелект, алгоритми та програмування, вплив обчислювальної техніки та кар'єрні зв'язки» [10, с. 86].

**Висновки.** Таким чином, важливим є аналіз сучасних закордонних підходів та тенденцій підготовки майбутніх учителів у контексті вивчення інтернет-технологій. Учені підкреслюють важливість вивчення інтернет-технологій в освітньому процесі, формування ІКТ-компетентності вчителів. Пропонують використовувати інноваційні методи навчання, наприклад, вебмікронавчання та роботу з імерсивними вебсередовищами, виконання групових проєктів на заняттях. Досліджують використання доповненої реальності, гейміфікації та серйозних ігор. Дослідники говорять про необхідність змінення навчальних програм підготовки майбутніх учителів. Тому перспективною є модернізація змісту та організації курсу «Інтернет-технології та ресурси» з їх урахуванням.

## Список використаних джерел


1. Brom, C., Drobna, A., Yaghobova, A., Stastny, D., Zabrodska, K., & Urban, M. (2025). From Servers to Satellites: Understanding Internet Principles among New Computer Science Teachers. *ACM Transactions on Computing Education*, 25, 1. https://doi.org/10.1145/3709150
2. Carvalho, R, Santos, C., & Ramos, F. (2025). Analyzing the transformative power of Immersive Web Environments in classroom though the lens of Bloom's taxonomy. *Computers & Education: X Reality*, 7. https://doi.org/10.1016/j.cexr.2025.100118
3. Lampropoulos, G., Keramopoulos, E., Diamantaras, K., & Evangelidis, G. (2023). Integrating Augmented Reality, Gamification, and Serious Games in Computer Science Education. *Education Sciences*, 13(6), 618. https://doi.org/10.3390/educsci13060618
4. Marquez-Baldo, L., Orellana, N., Almerich, G., & Jesus, S.-R. (2025). Attitude toward ICT integration for teachers. Validation of a multidimensional scale. *Computers in Human Behavior Reports*, 20. https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100786
5. Sugihartini, N., Elmunsyah, H., Nurhadi, D., & Rahmawati, Y. (2025). Innovative web-based microteaching model: To improve the teaching skills of prospective informatics teachers in vocational high schools. *Social Sciences & Humanities Open*, 11. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.101344
6. Szymkowiak, A., Melovic, B., Dabic, M., Jeganathan, K., & Kundi, D.S. (2021). Information technology and Gen Z: The role of teachers, the internet, and technology in the education of young people. *Technology in Society*, 65. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101565
7. Tomczyk, Ł. (2024). Digital competence among pre-service teachers: A global perspective on curriculum change as viewed by experts from 33 countries. *Evaluation and Program Planning*, 105. https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2024.102449
8. Uhanova, M., Prokofyeva, N., Katalnikova, S., & Ziborova, V. (2023). Possibilities for Organizing Group Work for Computer Science Students. *Procedia Computer Science*, 225. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.129
9. Whitmore, C.M. (2025). An exploration of the use of computer technologies in middle schools. *Social Sciences & Humanities Open*, 12. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2025.102260
10. Yadav, A., Connolly, C., Berges, M., Chytas, C., Franklin, C., Hijon-Neira, R., Macann, V., Margulieux, L., Ottenbreit-Leftwich, A., & Warner, J.R. (2022). A Review of International Models of Computer Science Teacher Education. *ITiCSE-WGR '22*, July 8–13, 2022, Dublin, Ireland. URL: https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/3571785.3574123

# ВИКОРИСТАННЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ НА ПРИКЛАДІ QGIS

**Заболотній О.А.**
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, Україна

**Анотація**. Розглянуто особливості використання геоінформаційної системи QGIS як засобу підтримки освітнього процесу у закладах вищої освіти. Проаналізовано можливості застосування програмного забезпечення для роботи з просторовими даними, їх візуалізації та аналізу під час підготовки здобувачів освіти різних спеціальностей. Визначено переваги використання QGIS для формування цифрової компетентності, розвитку практичних навичок та підвищення мотивації до навчання. Обґрунтовано доцільність використання відкритого програмного забезпечення у професійній підготовці майбутніх фахівців.

**Ключові слова**: QGIS, геоінформаційні системи, цифрова компетентність, просторові дані, освітній процес, прикладне програмне забезпечення.

# USE OF APPLICATION SOFTWARE FOR STUDENT EDUCATION ON THE EXAMPLE OF QGIS

**Zabolotnii O.A.**
Separated Subdivision of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute", Nizhyn, Ukraine

**Abstract**. The paper examines the features of using the QGIS geographic information system as a tool for supporting the educational process in higher education institutions. The possibilities of applying the software for processing, visualization, and analysis of spatial data in the training of students of various specialties are analyzed. The advantages of using QGIS for developing digital competence, practical skills, and learning motivation are identified. The expediency of using open-source software in the professional training of future specialists is substantiated.

**Keywords**: QGIS, geographic information systems, digital competence, spatial data, educational process, application software.

**Вступ**. Сучасний розвиток цифрових технологій суттєво впливає на систему вищої освіти та формує нові підходи до організації освітнього процесу. Одним із важливих напрямів цифровізації є використання прикладного програмного забезпечення, що забезпечує поєднання теоретичної підготовки здобувачів освіти з практичним застосуванням отриманих знань [4; 5].

Особливого значення набувають геоінформаційні системи, які забезпечують збір, зберігання, аналіз та візуалізацію просторових даних. Однією з найпоширеніших відкритих геоінформаційних систем є QGIS, що активно використовується у сфері освіти, науки, екології, землеустрою, містобудування та транспортного планування [1; 2].

**Постановка задачі**. В умовах цифрової трансформації освіти виникає потреба у впровадженні програмних засобів, які сприяють формуванню практичних навичок здобувачів освіти та підвищують ефективність освітнього процесу. Одним із таких інструментів є геоінформаційна система QGIS, що надає широкі можливості для роботи з просторовими даними, їх аналізу та візуалізації. Тому актуальним завданням є дослідження можливостей використання QGIS у професійній підготовці студентів різних спеціальностей.

**Метою** тез є аналіз особливостей використання геоінформаційної системи QGIS в освітньому процесі та визначення її ролі у формуванні професійних і цифрових компетентностей майбутніх фахівців.

**Виклад основного матеріалу**. Використання прикладного програмного забезпечення в закладах вищої освіти є важливим складником сучасного освітнього процесу. Практична спрямованість підготовки потребує застосування програмних засобів, які дозволяють

працювати з реальними даними, виконувати аналітичні операції та моделювати професійні ситуації [5].

QGIS є сучасною геоінформаційною системою з відкритим кодом, яка забезпечує створення, редагування, аналіз та візуалізацію просторових даних. Програмне забезпечення підтримує роботу з векторними та растровими даними, базами геоданих, супутниковими знімками, вебкартографічними сервісами та численними розширеннями для просторового аналізу [1; 2].

Важливою перевагою QGIS є його безкоштовне поширення та відкритість, що робить систему доступною для використання в освітньому процесі незалежно від фінансових можливостей закладу освіти. Крім того, програмне забезпечення підтримує багатоплатформність і може використовуватися на операційних системах Windows, Linux та macOS [2].

Під час підготовки здобувачів освіти QGIS може застосовуватися в межах різних дисциплін. У процесі вивчення геоінформаційних технологій студенти набувають навичок створення цифрових карт, роботи з координатними системами, геопросторового аналізу та геообробки даних. Для екологічних спеціальностей система може використовуватися для оцінювання стану навколишнього середовища, моніторингу природних ресурсів і дослідження екологічних процесів. У транспортній галузі QGIS дозволяє виконувати аналіз транспортної інфраструктури, будувати маршрути та оцінювати просторову доступність об'єктів.

Застосування QGIS сприяє формуванню цифрової компетентності здобувачів освіти. Під час виконання практичних завдань студенти працюють з відкритими наборами геоданих, зокрема ресурсами OpenStreetMap, статистичними даними та результатами дистанційного зондування Землі [3]. Такий підхід забезпечує розвиток навичок пошуку, обробки, аналізу та представлення інформації, які є важливими для сучасного фахівця.

Однією з ключових переваг використання QGIS є можливість наочного представлення результатів аналізу. Візуалізація просторових даних сприяє кращому сприйняттю складних процесів і підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу. Студенти можуть створювати тематичні карти населення, природних ресурсів, транспортної інфраструктури, екологічного стану територій та інших просторових явищ.

Використання геоінформаційних технологій також сприяє реалізації міждисциплінарного підходу в освіті. Можливості QGIS можуть бути інтегровані в дисципліни природничого, технічного, економічного та інформаційного спрямування, що забезпечує формування комплексного бачення сучасних професійних завдань.

Практика використання QGIS свідчить про підвищення мотивації студентів до навчання завдяки роботі з реальними просторовими даними та можливості отримання практично значущих результатів. Одночасно важливими умовами ефективного використання системи залишаються належне технічне забезпечення, підготовка викладачів та розроблення сучасних навчально-методичних матеріалів.

**Висновки**. Отже, використання геоінформаційної системи QGIS є ефективним засобом підвищення якості освітнього процесу в закладах вищої освіти. Система забезпечує поєднання теоретичної підготовки з практичною діяльністю, сприяє розвитку цифрової компетентності, аналітичного мислення та професійних навичок здобувачів освіти.

Застосування QGIS дозволяє працювати з реальними просторовими даними, виконувати їх аналіз, створювати тематичні карти та розв'язувати практичні завдання професійного спрямування. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення методик інтеграції геоінформаційних технологій у міждисциплінарну підготовку студентів та використання QGIS у поєднанні з сучасними цифровими освітніми платформами.

## Список використаних джерел

1. QGIS Documentation Project. QGIS User Guide. 2026. URL: https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/ (дата звернення: 30.05.2026).

2. QGIS.org. QGIS – A Free and Open Source Geographic Information System. 2026. URL: https://qgis.org/ (дата звернення: 30.05.2026).
3. OpenStreetMap Foundation. OpenStreetMap. 2026. URL: https://www.openstreetmap.org/ (дата звернення: 30.05.2026).
4. Биков В. Ю., Лещенко М. П. Цифрова трансформація освіти і науки: сучасні виклики та перспективи. Київ : Освіта України, 2023. 196 с.
5. Спірін О. М., Іванова С. М., Кільченко А. В. Цифрова компетентність учасників освітнього процесу в умовах трансформації освіти. Інформаційні технології і засоби навчання. 2023. Т. 95. № 3. С. 1–18.
6. European Commission. Digital Education Action Plan 2021–2027. 2024 Update. URL: https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan (дата звернення: 30.05.2026).
7. OECD. Digital Education Outlook 2024. Paris: OECD Publishing, 2024. URL: https://www.oecd.org/education/digital-education-outlook/ (дата звернення: 31.05.2026).

# ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ УМІНЬ З КОМП'ЮТЕРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КІБЕРГІГІЄНИ У БАКАЛАВРІВ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

**Злагодух Д.О., Злагодух К.О.**
Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

**Анотація**. Метою дослідження є процес розроблення та апробація інтегративної хмарної моделі, використання якої забезпечує одночасне формування технічних умінь з комп'ютерної електроніки та кібергігієни у бакалаврів спеціальності F3 (122) "Комп'ютерні науки". Об'єктом дослідження є процес практико-технічної підготовки бакалаврів з комп'ютерних наук. Предметом дослідження є хмарні технології, як інструмент інтеграції технічної та безпекової підготовки. Для досягнення мети поставлено такі завдання: проаналізувати сучасний стан формування технічних умінь і кібергігієни; розробити інтегративну хмарну модель; визначити педагогічні умови її ефективного впровадження; провести експериментальну апробацію та оцінити результати. У дослідженні використано теоретичні та емпіричні методи. Модель реалізовано на базі MATLAB Online та інструментів Microsoft 365. Здобувачі освіти одночасно виконують лабораторні роботи з моделювання електронних схем та обов'язкові завдання з кібергігієни. Розроблена хмарна модель є ефективним інструментом практико-технічної підготовки бакалаврів комп'ютерних наук. Вона забезпечує одночасне формування технічних умінь з комп'ютерної електроніки та навичок кібергігієни, легко масштабується і може бути рекомендована для впровадження в інших закладах вищої освіти

**Ключові слова**: хмарні технології, технічні уміння, комп'ютерна електроніка, кібергігієна, MATLAB Online, вища освіта, інформаційна безпека.

# THE USE OF CLOUD TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING TECHNICAL SKILLS IN COMPUTER ELECTRONICS AND CYBER HYGIENE AMONG BACHELOR STUDENTS OF COMPUTER SCIENCE

**Zlahodukh D., Zlahodukh K.**
Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The aim of the study is to develop and test an integrative cloud-based model that ensures the simultaneous formation of technical skills in computer electronics and cyber hygiene among Bachelor students majoring in F3 (122) "Computer Science". The object of the study is the process of practical and technical training of computer science undergraduates, while the subject is cloud as a tool for integrating technical and security training. To achieve this goal, the following tasks were set: to analyze the current state of technical skills and cyber hygiene formation; to develop an integrative cloud-based model; to determine the pedagogical conditions for its effective implementation; and to conduct experimental testing and evaluate the results. The study employed theoretical and empirical methods. The model was implemented using MATLAB Online and Microsoft 365 tools. Students simultaneously perform laboratory work on modelling electronic and mandatory cyber hygiene tasks.

**Keywords**: cloud technologies, technical skills, computer electronics, cyber hygiene, MATLAB Online, higher education, information security.

**Вступ**. Сучасний розвиток IT-галузі та інтенсивна цифровізація вищої освіти зумовлюють необхідність якісної підготовки бакалаврів з комп'ютерних наук, яка поєднує міцні технічні уміння з високим рівнем кібергігієни [2]. Традиційні форми лабораторних робіт з комп'ютерної електроніки не забезпечують одночасного розвитку цих компетентностей.

**Постановка задачі**. Існує розрив між теоретичними знаннями здобувачіва освіти і практичними технічними уміннями з комп'ютерної електроніки, а також недостатній рівень сформованості навичок кібергігієни в умовах активного використання хмарних сервісів [6].

**Мета роботи**. Розробити та експериментально перевірити інтегративну хмарну модель формування технічних умінь з комп'ютерної електроніки та кібергігієни у бакалаврів спеціальності F3 (122) "Комп'ютерні науки".

**Основна частина**. Сучасні дослідження підтверджують, що використання хмарних технологій (Таблиця 1) відкривають нові можливості для трансформації інженерної освіти [4]. Зокрема, використання MATLAB Online дозволяє здобувачам освіти отримувати доступ до інструментів моделювання електронних схем без потреби у встановленні дороговартісного програмного забезпечення на локальні комп'ютери, що значно підвищує доступність і гнучкість освітнього процесу [5]. Водночас перехід до хмарних сервісів створює додаткові кіберризики, оскільки здобувачі освіти постійно працюють з реальними хмарними середовищами [7].

Важливим аспектом запропонованої моделі є комплексне формування навичок кібергігієни. Під кібергігієною розуміється не тільки теоретичні знання з інформаційної безпеки, а й практичні навички та стійкі звички безпечної роботи в цифровому середовищі. У сучасних умовах використання хмарних сервісів суттєво підвищує кіберризики, оскільки здобувачі постійно працюють з реальними онлайн-платформами, що містять їхні навчальні дані, результати проєктів та особисту інформацію. У цьому контексті особливо актуальним стає інтегративний підхід, під час якого формування технічних умінь відбувається паралельно з розвитком навичок кібергігієни [2]. Такий синергетичний ефект дає можливість не тільки підвищувати якість практичної підготовки, але й формувати у майбутніх фахівців навички та звички безпечної роботи в цифровому середовищі, що відповідає сучасним вимогам ринку праці [3].

Запропонована модель реалізується на базі MATLAB Online у поєднанні з інструментами Microsoft 365. Викладач створює завдання з моделювання електронних схем, до яких вбудовуються обов'язкові практики кібергігієни (MFA, шифрування файлів, перевірка логів доступу). Здобувач освіти проходить автентифікацію, виконує технічне моделювання, зберігає результати з дотриманням вимог безпеки та аналізує логи доступу.

У якості прикладу технічного завдання для реалізації запропонованої моделі виступає лабораторна робота «Моделювання цифрових систем індикації в MATLAB Online / Simulink» [1]. У рамках цієї лабораторної здобувачі освіти набувають глибоких технічних умінь з комп'ютерної електроніки. Вони проєктують та симулюють Simulink-модель 4-бітного лічильника з дешифратором та 7-сегментним індикатором (Common Cathode); виконують моделювання статичної індикації, налаштовують параметри симуляції (Pulse Generator, Sample time), створюють власну MATLAB функцію для дешифратора, проводять віртуальне тестування та аналізують результати Організоване таким чином завдання дозволяє здобувачам освіти опанувати принципи роботи цифрових вузлів, методи логічного проєктування, часову логіку та візуалізацію результатів у віртуальному середовищі, що є ключовим при формування технічних умінь у майбутніх фахівців з комп'ютерних наук.

Паралельно з технічним моделюванням, здобувачі освіти виконують обов'язкові практичні завдання з кібергігієни, що дозволяє інтегрувати формування безпекових компетентностей безпосередньо в процес виконання лабораторної роботи. Кожне технічне завдання супроводжується комплексом безпекових дій, які здобувачі повинні виконати свідомо та зафіксувати. Зокрема здобувачі здійснюють вхід у MATLAB Online виключно через двофакторну автентифікацію (MFA), працюють лише в захищеному середовищі з використанням протоколу TLS, шифрують файли моделей (.slx) перед збереженням, перевіряють логи доступу до своїх файлів у Microsoft 365, налаштовують необхідні рівні доступу та виконують безпечне збереження результатів у OneDrive/SharePoint з увімкненим контролем версій. Крім того, вони аналізують власні логи активності, виявляють потенційно підозрілі події та рефлексують щодо застосованих заходів безпеки. Такий підхід перетворює звичайну лабораторну роботу з комп'ютерної електроніки на комплексне практико-орієнтоване заняття, де формування технічних умінь відбувається синхронно з розвитком практичних навичок кібергігієни. Здобувачі не просто моделюють електронні схеми, а й одночасно набувають досвіду безпечної роботи в реальному хмарному середовищі, що є критично важливим для майбутньої професійної діяльності здобувачів.

Таблиця 1

**Хмарні технології та їх вплив на розвиток здобувачів освіти**

| Хмарна технологія | Мета використання | Технічні вміння з комп'ютерної електроніки | Вміння кібергігієни та інформаційної безпеки |
|---|---|---|---|
| MATLAB Online / Simulink | Моделювання лічильника та 7-сегментного індикатора | Проєктування цифрових схем, робота з лічильниками, дешифраторами, написання функцій, налаштування симуляції | Безпечна автентифікація з використанням MFA, робота в хмарному середовищі, робота лише через захищене з'єднання (TLS); перевірка логів сесії; уникнення зберігання паролів і чутливих даних у скриптах; рефлексія щодо власних дій з точки зору безпеки; регулярне очищення тимчасових файлів |
| Microsoft 365 OneDrive | Збереження та обмін результатами моделювання | Робота з хмарними сховищами, версій ний контроль | Шифрування файлів перед збереженням, правильне налаштування рівнів доступу; перевірка історії змін і логів доступу; безпечне поширення посилань; використання контрольованого доступу за терміном дії |
| Microsoft 365 Security | Захист навчальних матеріалів | Аналіз результатів симуляції | Двофакторна автентифікація; моніторинг сповіщень про підозрілу активність; розпізнавання фішингових загроз і соціальної інженерії, аналіз логів активності акаунта |

**Висновок**. Розроблена хмарна модель формування технічних умінь з комп'ютерної електроніки та кібергігієни демонструє ефективність у практико-технічній підготовці бакалаврів комп'ютерних наук. Запропонований підхід забезпечує синергетичний ефект: студенти одночасно опановують сучасні інструменти моделювання (MATLAB Online / Simulink) та набувають критичних компетентностей безпечної роботи в хмарному середовищі. Модель є доступною і не вимагає значних матеріальних витрат на обладнання, забезпечуючи одночасне формування технічних умінь з комп'ютерної електроніки та навичок кібергігієни, легко масштабується і може бути рекомендована для впровадження в інших закладах вищої освіти. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі на інші технічні дисципліни та проведенням довгострокового експерименту для більш глибокої оцінки впливу на професійну підготовку майбутніх ІТ-фахівців.

## Список використаних джерел


1. Злагодух Д. О. Модель практико-технічної підготовки фахівців з комп'ютерних наук на основі інтегративного підходу // Перспективи та інновації науки (Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина»). – 2025. – № 8(54). – С. 375–390.
2. Злагодух К. О. Формування кібергігієни у закладах вищої освіти: організаційно-педагогічні підходи та практичні стратегії // Науковий часопис УДУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2. 2025. № 24(31). С. 77-86.
3. Малежик П. М. Теоретичні й методичні засади технічної підготовки майбутніх фахівців з інформаційних технологій : дис. … д-ра пед. наук. Київ, 2020.
4. Osadchyi V. V., et al. Cloud technologies for STEM education // CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2643. P. 24–35.
5. MathWorks. MATLAB and Simulink for Electrical and Computer Engineering. URL: https://www.mathworks.com/solutions/electrical-computer-engineering.html (дата звернення: 07.05.2026).
6. Hobbs J. Cybersecurity awareness in higher education // Issues in Information Systems. 2023. Vol. 24(1). P. 159–169.
7. Microsoft. Microsoft 365 Security Best Practices for Education. 2025.

# АДАПТАЦІЯ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДО ВИКЛИКІВ ІНТЕГРАЦІЇ ШІ В ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

**Кархут В.Я., Галицький О.В.**
Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

**Анотація**. У роботі досліджено проблему адаптації системи підготовки майбутніх інженерів програмного забезпечення до умов стрімкої інтеграції генеративного штучного інтелекту в індустріальні процеси розроблення програмного забезпечення. Проаналізовано трансформацію класичного життєвого циклу розробки під впливом інтелектуальних асистентів та висвітлено ризики виникнення «ефекту скляної стелі», що призводить до ерозії фундаментальних алгоритмічних навичок здобувачів. Обґрунтовано необхідність переходу від традиційного оцінювання результату до верифікації розуміння архітектурної логіки. Запропоновано концепцію спеціалізованої вибіркової навчальної дисципліни «Інтелектуальна інженерія ПЗ: методи промпт-інжинірингу та проєктування ШІ-систем», яка спрямована на формування цілісних компетентностей з експлуатації та проектування ШІ систем. Визначено, що такий підхід забезпечує конкурентоспроможність випускників на сучасному ринку праці та їхню готовність до проходження складних технічних інтерв'ю в умовах великих компаній.

**Ключові слова**: штучний інтелект, життєвий цикл розроблення програмного забезпечення, промпт-інжиніринг, підготовка майбутніх інженерів з розробки програмного забезпечення.

# ADAPTING THE TRAINING OF FUTURE SOFTWARE ENGINEERS TO THE CHALLENGES OF AI INTEGRATION INTO THE SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE

**Karkhut V., Halytskyi O.**
Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. The paper explores the problem of adapting the training system for future software engineers to the conditions of rapid integration of generative artificial intelligence into industrial software development processes. The transformation of the classical software development life cycle under the influence of intelligent assistants is analysed, and the risks of the "glass ceiling effect", which leads to the erosion of students' fundamental algorithmic skills, are highlighted. The necessity of transitioning from traditional result-based assessment to the verification of architectural logic understanding is substantiated. The concept of a specialized elective course, "Intelligent Software Engineering: Prompt Engineering Methods and AI Systems Design," is proposed, aimed at forming comprehensive competencies in the operation and design of AI systems. It is determined that such an approach ensures the competitiveness of graduates in the modern labour market and their readiness for complex technical interviews in big tech companies.

**Keywords**: artificial intelligence, software development life cycle, prompt engineering, training of future software engineers.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку цифрових технологій характеризується безпрецедентно стрімкою експансією інструментів штучного інтелекту, що кардинально трансформує глобальний ландшафт розроблення програмного забезпечення. Ці зміни виходять далеко за межі суто технічної модернізації індустрії розроблення програмного забезпечення, створюючи фундаментальні виклики для системи вищої освіти. Необхідність синхронізації темпів підготовки майбутніх інженерів програмного забезпечення із динамікою технологічного прогресу ставить перед академічною спільнотою завдання не лише інтеграції нових інструментів, а й стратегічного перегляду самої філософії формування професійної обізнаності у системі підготовки інженерів з розробки програмного забезпечення.

**Мета роботи**. Метою роботи є дослідження сучасних викликів які ставить стрімка інтеграція ШІ в розроблення програмного забезпечення та пошук відповідей на них у адаптації системи підготовки майбутніх фахівців.

**Постановка задачі**. Стрімка експансія технологій генеративного штучного інтелекту та їхня глибока інтеграція у професійне середовище розроблення програмного забезпечення зумовлює потребу в радикальному перегляді парадигми підготовки майбутніх фахівців розробників програмного забезпечення. Сучасний стан розвитку галузі свідчить про те, що ШІ-інструменти, такі як GitHub Copilot, Cursor та автономні ШІ-агенти (наприклад, Devin), перестають бути лише допоміжними засобами доповнення коду. Вони трансформують кожен етап життєвого циклу розроблення ПЗ: від автоматизованої генерації вимог та архітектурних діаграм до написання складних модулів, проведення рефакторингу коду та розгортання високонавантажених систем, що фактично змінює роль інженера з виконавця коду на архітектора та валідатора рішень [1].

Проте масове використання ШІ створює специфічні виклики для вищої освіти. По-перше, виникає ризик формування «ефекту скляної стелі», коли здобувачі освіти, покладаючись на готові рішення ШІ, втрачають здатність до глибокого аналізу алгоритмів та розуміння фундаментальних принципів управління пам'яттю чи обчислювальної складності [2]. По-друге, класичні методи оцінювання знань через перевірку результату стають нерелевантними в епоху, коли цей результат може бути згенерований за лічені секунди.

У зв'язку з цим, критично необхідною стає адаптація освітнього процесу, яка має полягати не у забороні інтелектуальних систем, а у розробці спеціалізованих дисциплін та нових методик оцінювання. Це дає можливість сформувати у майбутніх інженерів компетентності, що відповідають реаліям ШІ-аугментованої розробки, зберігаючи при цьому високий рівень професійної експертизи, необхідний для подолання бар'єрів на технічних інтерв'ю у провідних технологічних компаніях. Основний акцент зміщується з перевірки написаного коду на перевірку розуміння архітектурної логіки та здатності виявляти «галюцинації» ШІ [3].

**Вирішення проблеми**. Адаптація вищої освіти до викликів, зумовлених стрімким розвитком генеративного ШІ, є комплексним завданням, що потребує багаторівневих рішень. Трансформація має охоплювати як процес підготовки навчального контенту викладачем (оновлення лекційного матеріалу, генерація актуальних кейсів), так і докорінну зміну методів перевірки знань (перехід від оцінювання кінцевого коду до аналізу процесу його створення та обґрунтування прийнятих рішень).

На сьогодні варто виділити два основні стратегічні шляхи інтеграції ШІ-компетентностей у навчальний процес:

1. Точкова інтеграція: впровадження окремих модулів або специфічних видів робіт із використанням ШІ (наприклад, проведення автоматизованого код ревю або генерація юніт тестів) у межах традиційних технічних навчальних дисциплін.
2. Системне впровадження: створення спеціалізованих навчальних курсів, що забезпечують фундаментальне розуміння нової парадигми розробки.

Одним із найбільш ефективних рішень у межах другого підходу є впровадження вибіркової дисципліни «Інтелектуальна інженерія ПЗ: методи промпт-інжинірингу та проєктування ШІ-систем».

Основний фокус навчальної дисципліни спрямований на формування у майбутніх фахівців цілісного уявлення про сучасний стеку засобів ШІ в розробці, їхні переваги, обмеження та ризики (зокрема проблему «галюцинацій» та безпеки коду). Навчальна дисципліна базується на новітніх методологіях ШІ-аугментованої розробки, де роль програміста трансформується у роль архітектора та верифікатора інтелектуальних систем.

Структурно дисципліна охоплює наступні ключові розділи:

1. Основи Generative AI та LLM для інженерії ПЗ: вивчення архітектурних принципів моделей та їхніх можливостей у контексті SDLC;

2. Методологія промпт-інжинірингу: опанування технік Zero-shot, Few-shot, Chain-of-Thought для генерації складних програмних структур;
3. Проєктування AI-native систем: розробка архітектур, що інтегрують ШІ-агентів та зовнішні API (наприклад, LangChain, RAG-системи);
4. Валідація та безпека AI-генерованого коду: вивчення методів тестування та етичних аспектів використання ШІ.

Метою навчальної дисципліни є не просто навчити студента користуватися чат-ботами, а виробити стійку навичку критичного оцінювання результатів роботи ШІ. Це дає можливість майбутнім інженерам програмного забезпечення успішно долати бар'єри на технічних інтерв'ю в провідних компаніях, де цінується здатність до глибокого аналізу та написання чистого, аргументованого коду навіть без доступу до інтелектуальних асистентів.

**Висновок**. У роботі розглянуто актуальні питання адаптації освітнього процесу майбутніх інженерів програмного забезпечення до умов масової інтеграції генеративного штучного інтелекту в життєвий цикл розроблення ПЗ. Обґрунтовано необхідність трансформації методів підготовки та оцінювання обізнаності здобувачів для запобігання втрати фундаментальних навичок програмування. Запропоновано концепцію спеціалізованої дисципліни, що враховує сучасні виклики AI-аугментованої розробки та вимоги IT-індустрії.

## Список використаних джерел


1. Dohmke T., Kuprenas A., Sharma A. (2023). Sea Change: The Future of AI-Augmented Software Engineering. *IEEE Software*, 40(3), 18-22. https://doi.org/10.1109/MS.2023.3251233
2. Kazemitabaar M., Chow J., Ma C. K. T. et al. (2023). Studying the effect of AI-assisted code generation on students' learnability of programming. *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1-16. https://doi.org/10.1145/3544548.3580919
3. Ouhbi S., Pombo N. (2024). Software Engineering Education in the Era of Generative AI. *Computer*, 57(1), 102-106. https://doi.org/10.1109/MC.2023.3327240

# ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ СУЧАСНИМ ВИМІРЮВАЛЬНИМ УСТАТКУВАННЯМ У КОНТЕКСТІ МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ У ГРОМАДСЬКІ ПЛАТФОРМИ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

**Михнович А.[1], Пилипович О.[1], Андрейчук Ю.[1], Іванов Є.[1], Ковальчук І.[2]**
[1]Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів
[2]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

**Анотація.** Метою статті є продемонструвати можливості інтеграції передових інформаційних технологій (Openstreet/lab, GPS, GNSS, LiDAR-сканування, GIS-AI) у процес підготовки фахівців з охорони довкілля нового покоління, які покликані зайняти ключове місце у процесі цифрової трансформації природоохоронної сфери та післявоєнної відбудови України. Мета досягається: аналізом існуючих систем моніторингу довкілля в Україні, впровадженням на бакалаврському рівні освіти нової освітньо-професійної програми "Геоінформаційні технології захисту навколишнього середовища" (G2 – Технології захисту навколишнього середовища), створенням та обладнанням навчальної міждисциплінарної лабораторії GeoEcoHUB у формі інноваційної платформи, створеної у партнерстві з освітньо-науковим центром Львівської обласної Малої академії наук імені Ігоря Юхновського, інтеграцією виконуваних учнями і студентами екологічних проєктів у мережі громадського моніторингу на інтернет платформах.
**Ключові слова:** геоінформаційні технології, навчальна лабораторія, технології контролю стану довкілля; інтеграція даних, громадський моніторинг довкілля.

# PROVISION OF THE EDUCATIONAL PROCESS BY A MODERN MEASURING EQUIPMENT IN THE CONTEXT OF INTEGRATION INTO PUBLIC PLATFORMS OF ENVIRONMENT MONITORING

**Mykhnovych A.[1], Pylypovych O.[1], Andreychuk Y.[1], Ivanov Y.[1], Kovalchuk I.[2]**
[1]Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine
[2]National University of Life Sciences and Nature Use, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The aim of the paper is to demonstrate the possibilities of recent IT (Openstreet/lab, GPS, GNSS, LiDAR-сканування, GIS-AI) in the study process of environment protection specialists of the new generation. These specialists can play a key role in the digital transformation of nature protection and post-war recovery in Ukraine. The aim is obtained due to a few directions of work: expert analysis of the recent state of the environmental monitoring system in Ukraine defying the key imperfections, starting the new bachelor study program "Geoinformational technologies of environment protection" (within the specialty G2 – Environment protection technologies), creating of the study interdisciplinary laboratory GeoEcoHUB as an innovation platform in the partnership with the Education-scientific Centre of Lviv Regional Small Academy of Science named after Ihor Yuchnovskyi, and integrating students ecological projects into public environmental monitoring networks on the Internet base.
**Keywords:** Geoinformational technologies, study laboratory, environment state control technologies, data integration, public monitoring of the environment.

**Вступ.** В Україні проблема деградації екосистем і зростаючого антропогенного навантаження поглиблена багатолітньою російською агресією, що зумовило потребу у розрахунках збитків, завданих довкіллю і ресурсам, плануванні екологічної реабілітації деокупованих територій. Вирішення цих завдань неможливе без застосування передових геоінформаційних систем і технологій. Водночас, відбуваються зміни у вимогах ринку праці до випускників вищої школи. Ринок, насичений ІТ-сектором, вже не може задовольнятись фахівцями, які володіють здебільшого теоретичними знаннями і потребує здатних поєднувати глибокі знання предмету з навичками проєктування та програмування. Традиційна модель навчання у ЗВО ГІС-технологіям здебільшого залишається на ознайомчому рівні. Це обмежує конкурентоспроможність, оскільки вирішення сучасних викликів потребує розробників індивідуальних алгоритмів опрацювання даних та

архітекторів власних ГІС-інфраструктур. Необхідно створити освітнє середовище, де ГІС-технології розглядаються не як допоміжний інструмент візуалізації, а як фундаментальна платформа для інтелектуального аналізу та прийняття управлінських рішень.

**Метою** є продемонструвати можливості і приклади інтеграції передових інформаційних технологій у структуру підготовки фахівців з охорони довкілля нового покоління, на основі принципів неперервності освіти, єдності теоретичних знань з практикою реалізації конкретних екологічних проєктів. Ці фахівці – ключові фігури у процесі цифрової трансформації природоохоронної сфери та майбутньої відбудови України. Простором для реалізації поставленої мети є процеси інтеграції навчальної геоінформаційної лабораторії у так звані мережі громадського моніторингу довкілля.

**Результати та обговорення.** Стан державних систем моніторингу довкілля неодноразово ставав предметом фахового наукового аналізу з обґрунтуванням підходів, стратегій і тактик його вдосконалення [1]. На підставі здійснених досліджень констатуємо, що головними недоліками, які унеможливлюють об'єктивну оцінку екологічної ситуації і якісне математичне моделювання процесів у довкіллі є: нерівномірність розташування пунктів спостереження, недостатня щільність охоплення ключових ділянок, низька репрезентативність стосовно різноманітності природних умов та антропогенних навантажень, дефіцит пунктів у транскордонних зонах, обмежений перелік контрольованих хімічних речовин і сполук, недостатній фоновий, кризовий, а також спеціальний моніторинг, ускладнений доступ до архівної моніторингової інформації. Критичними залишаються проблеми матеріально-технічного забезпечення: брак стандартного сертифікованого набору вимірювальних приладів та устаткування, цифрових автоматизованих вимірювальних приладів, недостатня кількість потужної комп'ютерної техніки та відповідного програмного забезпечення, брак коштів на постійне оперативне публікування результатів моніторингу, видання інформаційних матеріалів, інформування громадськості, тощо.

Тому, як альтернативне рішення, враховуючи недоліки державного моніторингу і труднощі з фінансуванням його перебудови, науковці і практики все частіше пропонують проєкти створення громадських мереж моніторингу компонентів довкілля на основі відкритих інформаційних платформ [2]. Громадський моніторинг сприяє формуванню міжсекторальної співпраці на основі об'єднання ресурсів різних інститутів, установ, закладів: влади, науковців, освітян, підприємців, громадських організацій, екоактивістів тощо. При цьому саме освітяни й науковці, студенти та громадські активісти зможуть забезпечити незалежну інформаційну підтримку різноманітним проектам та ініціативам.

З метою реалізації цієї стратегічної цілі і задоволення вимог ринку, колективом географічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка із залученням фахівців факультету прикладної математики вперше в Україні запропоновано впровадження на першому (бакалаврському) рівні освіти нової освітньо-професійної програми "Геоінформаційні технології захисту навколишнього середовища", яка відкрита в межах спеціальності G2 – Технології захисту навколишнього середовища. Метою програми є підготовка фахівців, які здатні здійснювати самостійні дослідження, оцінювати екологічні ризики для довкілля, володіти сучасним програмним забезпеченням і технологіями збору та опрацювання геопросторової інформації, розв'язувати задачі проектування, розробки, впровадження та експлуатації геоінформаційних систем з метою захисту довкілля. Інструментальну базу становить сучасне технологічне і лабораторне обладнання, комп'ютерна техніка та програмне забезпечення, обладнання й устаткування для польового, цифрового, дистанційного і лабораторного досліджень, а також сучасне програмне забезпечення геоінформаційного спрямування. Особливе місце в методиці навчання займає проєктно-орієнтований підхід, який дозволяє інтегрувати розрізнені знання з програмування, математичної статистики та екології в єдиний практичний результат. Студенти не просто вивчають синтаксис мови Python або структуру SQL-запитів, а опановують їх застосування для вирішення конкретних прикладних завдань, як то автоматизоване виявлення змін рослинного покриву за даними дистанційного зондування чи

моделювання розповсюдження забруднюючих речовин у водному середовищі [3]. Це стає запорукою того, що майбутній фахівець буде здатен не лише працювати з існуючою інформацією, а й створювати нову цифрову інфраструктуру для моніторингу довкілля.

Ринок в Україні стрімко наповнюється асортиментом цифрового вимірювального обладнання, яке часто не має калібрування та державної сертифікації. У контексті розбудови інформаційних платформ з відкритим доступом для наповнення даними про стан довкілля, отриманими представниками громадськості, внесок навчальних установ є доступним й оперативним способом масштабування нових практик. Учасники формують розгалужену мережу отримання так званих індикативних вимірювань в контексті громадського моніторингу якості довкілля. Перевага — це можливість поширення та масштабування ідей і практик екологічного самоінформування громадськості, об'єднання зусиль зацікавлених сторін у спільну діяльність, наповнення мережі приладами за рахунок учасників. Пункти моніторингу індикативного характеру варто використовувати у поєднанні з пересувними і стаціонарними сертифікованими пунктами спостереження та лабораторіями. Відносно невисока вартість бюджетного сегменту вимірювального обладнання сприяє застосуванню у кількості, в рази більшій, ніж офіційні пункти спостереження, а отже отримати значно більшу територію покриття даними, водночас зменшивши навантаження на місцеві бюджети.

На географічному факультеті ЛНУ імені Івана Франка функціонує лабораторія GeoEcoHUB — інноваційна платформа, створена у партнерстві з освітньо-науковим центром Львівської обласної Малої академії наук імені Ігоря Юхновського. Лабораторія покликана стати осередком для молоді, яка прагне віднайти себе у справі захисту довкілля. Це черговий приклад й елемент створюваної мережі громадського моніторингу довкілля України, простір, де школярі можуть вийти за межі підручників і відчути себе частиною великої академічної спільноти, свідомо обираючи свій майбутній фах. Опановуючи роботу з даними дистанційного зондування Землі, геоінформаційними технологіями картографування (Openstreet/lab, GPS, GNSS, LiDAR сканування, GIS-AI), спеціальними геопросторовими сервісами та сучасними вимірювальними засобами моніторингу довкілля, молодь на практиці бачить як цифрові інструменти допомагають вирішувати глобальні екологічні виклики. Викладачі факультету здійснюють науковий супровід дослідницьких пошуків вихованцями МАН, забезпечують керівництво курсовими та кваліфікаційними роботами студентів, які навчаються проводити комплексні дослідження, охоплюючи усі етапи роботи – від польового збору даних до побудови складних картографічних і тривимірних моделей.

**Висновки.** Внесок освітян і науковців полягає у підготовці фахівців у межах освітньої програми "Геоінформаційні технології захисту навколишнього середовища" на основі принципу наскрізного навчання, де кожен етап освітньої траєкторії випливає з попереднього та готує підґрунтя для наступного (від польових обстежень і збору даних, до фаз проєктування складної архітектури баз геоданих, аналізу та синтезу). Результатом впровадження запропонованих напрямків роботи є формування нового профілю фахівця – ГІС-інженера в охороні довкілля, який поєднує глибокі знання природоохоронця з аналітичним інструментарієм розробника інформаційних систем. Такий випускник вже має здатність до самостійної розробки та розгортання повноцінної інфраструктури просторових даних, проектування архітектури серверних рішень та створення інтегрованих систем автоматизованого моніторингу довкілля, починаючи від відкритих платформ громадського рівня до складних комплексних систем державного моніторингу.

## Список використаних джерел


1. Екологічний моніторинг регіону: експертна оцінка стану і функціонування / За ред. д. геогр. н., Проф. І. Ковальчука. Львів: "Опілля-Л", 2009. 608 с.
2. Метеопост. Карта забруднення повітря. URL: https://meteopost.com/air-pollution/ (дата звернення 8.05.2026).
3. Часковський О., Андрейчук Ю., Ямелинець Т. Застосування ГІС у природоохоронній справі на прикладі відкритої програми QGIS: навч. посібн. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, Вид-во Простір-М, 2021. 228 с.

# DATA-DRIVEN ДІАГНОСТИКА КОМУНІКАЦІЙНИХ РОЗРИВІВ У МІЖНАРОДНИХ ОСВІТНІХ КОНСОРЦІУМАХ

**Мунд Й.-П.[1], Хрутьба В.[1], Руденко С.[2], Ковтун Т.[2], Єгорченкова Н.[3], Нікітченко Ю.[1]**
[1]Університет сталого розвитку, Еберсвальде, Німеччина
[2]Одеський національний морський університет, Україна
[3]Університет Коменського, Братислава, Словаччина

**Анотація.** Ефективна координація учасників міжнародних освітньо-наукових консорціумів неможлива без належно організованої комунікаційної системи. Метою роботи є розробка та верифікація інструменту кількісної діагностики комунікаційних розривів у міжнародних освітніх консорціумах. Запропоновано data-driven підхід до діагностики структурних комунікаційних розривів (governance gaps) у консорціумах Erasmus+, Horizon Europe та DAAD. Розроблено п'ятивимірну модель communication governance та індекс комунікаційної ентропії як інструмент її кількісного вимірювання. Для збору даних використано структурований онлайн-опитувальник (Google Forms); автоматизований розрахунок індексу комунікаційної ентропії реалізовано засобами Google Apps Script. Емпіричну базу становлять дані учасників міжнародних консорціумів. Результати підтвердили структурний, а не культурний характер комунікаційної ентропії: значення індексу для українських та іноземних учасників виявились близькими попри суттєві інституційні відмінності. Найбільш вразливим виміром в обох групах стала система документування. Розроблений інструментарій забезпечує цільове фокусування зусиль координатора на усунення конкретних governance gaps.

**Ключові слова:** міжнародний освітній консорціум; освітній проєкт; комунікаційна ентропія; комунікаційний розрив; data-driven діагностика.

# DATA-DRIVEN DIAGNOSTICS OF COMMUNICATION GAPS IN INTERNATIONAL EDUCATIONAL CONSORTIA

**Mund J.-P.[1], Khrutba V.[1], Rudenko S.[2], Kovtun T.[2], Yehorchenkova N.[3], Nikitchenko Yu.[1]**
[1]Eberswalde University for Sustainable Development, Eberswalde, Germany
[2]Odesa National Maritime University, Ukraine
[3]Comenius University, Bratislava, Slovakia

**Abstract.** Effective coordination of international educational and scientific consortium participants requires a well-organised communication system. The aim of this paper is to develop and verify a tool for quantitative diagnostics of communication gaps in international educational consortia. A data-driven approach is proposed for diagnosing structural communication gaps (governance gaps) in Erasmus+, Horizon Europe and DAAD consortia. A five-dimensional communication governance model and a Communication Entropy Index are developed as instruments for its quantitative measurement. Data were collected via a structured online survey (Google Forms); automated calculation of the Communication Entropy Index was implemented using Google Apps Script. The empirical base comprises data from international consortium participants. The results confirmed the structural rather than cultural nature of communication entropy: index values for Ukrainian and foreign participants proved similar despite significant institutional differences between the groups. The documentation system was identified as the most vulnerable governance dimension in both groups. The developed toolkit enables targeted focusing of the coordinator's efforts on eliminating specific governance gaps.

**Keywords:** international educational consortium; educational project; communication entropy; communication gap; data-driven diagnostics.

**Вступ.** Цифрова трансформація освіти та активний розвиток міжнародного академічного співробітництва суттєво змінили вимоги до управління інформаційними процесами в освітніх проєктах. Міжнародні освітньо-наукові консорціуми, що реалізуються в рамках програм Erasmus+, Horizon Europe та DAAD, об'єднують університети різних країн у спільній роботі з розробки освітніх програм, проведення досліджень та обміну досвідом. Незважаючи на широке впровадження цифрових інструментів комунікації – платформ

відеоконференцій, хмарних сховищ – практика реалізації таких проєктів систематично демонструє комунікаційні збої: затримки виконання завдань, конфлікти через неузгодженість очікувань, втрату критичної інформації та дублювання робіт [1]. Показово, що самі по собі цифрові інструменти не усувають комунікаційну дисфункцію – вони лише змінюють її форму, замінюючи дефіцит інформації її структурно неорганізованим надлишком [2].

Традиційне пояснення проблем через культурні та мовні відмінності між партнерами є обмеженим: проєкти з мінімальною культурною різноманітністю стикаються з аналогічними труднощами [3]. Це вказує на те, що першопричина комунікаційної дисфункції – не склад учасників, а відсутність структурних механізмів управління інформаційними потоками, розподілу відповідальності та стандартів взаємодії, тобто того, що у сучасних стандартах проєктного управління визначається як *communication governance* [4].

**Метою дослідження** є розробка та верифікація data-driven інструменту діагностики комунікаційних розривів (governance gaps) у міжнародних освітньо-наукових консорціумах на основі структурованого онлайн-опитування.

**Цифровий інструментарій.** Центральним елементом запропонованого підходу є Communication Entropy Index (CEI) – кількісний індекс, що вимірює рівень комунікаційної ентропії через оцінку п'яти структурних елементів communication governance: структури відповідальності (AS), організації каналів (CO), протоколів взаємодії (CP), часової структури (TS) та системи документування (DS).

Для збору та обробки даних розроблено структурований онлайн-опитувальник на платформі Google Forms, що містить 25 тверджень (5 вимірів по 5 тверджень), які оцінюються за п'ятибальною шкалою Лікерта. Опитувальник реалізовано у двох мовних версіях – українській та англійській. Автоматизовану обробку відповідей і розрахунок CEI здійснено засобами Google Apps Script: скрипт зчитує дані з таблиці відповідей, розраховує середні бали за кожним виміром, обчислює загальний CEI та формує індивідуальний профіль governance із зазначенням зони ентропії. Такий підхід забезпечує масштабованість інструменту та можливість його використання координаторами консорціуму без спеціальної технічної підготовки.

**Результати.** Емпіричну базу становлять дані опитування 55 учасників консорціумів Erasmus+, Horizon Europe та DAAD: 40 представників українських університетів та 15 – партнерських установ з країн ЄС (Румунія, Хорватія, Польща, Словаччина, Німеччина). За роллю переважну більшість склали керівники команд та проєктні менеджери; за досвідом – учасники з 4 і більше міжнародних проєктів. Зведені результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Середні значення вимірів governance та загальний CEI за групами**

| Вимір CEI | Українські (N=40) | Іноземні (N=15) | Загалом (N=55) |
|---|---|---|---|
| Структура відповідальності (ASE) | 3,775 | 3,773 | 3,775 |
| Організація каналів (COE) | 3,885 | 3,907 | 3,891 |
| Протоколи комунікації (CPE) | 3,670 | 3,640 | 3,662 |
| Часова структура (TSE) | 4,050 | 4,187 | 4,087 |
| Система документування (DSE) | 3,165 | 3,693 | 3,309 |
| Загальний CEI | 2,291 | 2,160 | 2,255 |

Загальний CEI зведеної вибірки становить 2,255, що відповідає зоні помірної ентропії. Ключовим результатом є близькість значень між культурно та інституційно відмінними групами ($\Delta$=0,131): обидві групи перебувають в одній зоні ентропії, що суперечить

традиційному поясненню комунікаційних збоїв через крос-культурні відмінності та підтверджує їх структурний характер [5]. Диференційований профіль вимірів розкриває внутрішню логіку цього явища: найвищі оцінки отримали аспекти governance, що безпосередньо регламентуються вимогами донорських програм (часова структура, TSE=4,087), тоді як елементи, що потребують свідомого проєктування самими партнерами, є систематично слабшими.

Найбільш вразливим виміром в обох групах виявилась система документування (DSE=3,309). Слабкість цього елементу є особливо значущою в контексті цифрового управління проєктами: відсутність структурованої документаційної системи означає, що консорціум не формує інституційної пам'яті – логіка прийнятих рішень губиться, наступні фази не можуть спиратися на накопичений досвід, а цифрові репозиторії перетворюються на неструктуровані сховища файлів без системи версіонування та пошуку. Найбільша міжгрупова розбіжність також зафіксована за цим виміром (Δ=0,528 на користь іноземних учасників: 3,693 проти 3,165), що може свідчити про більш розвинені інституційні практики управління документацією в університетах ЄС.

У зонах високої та критичної ентропії перебувають 20,0% українських учасників проти 6,7% іноземних. Ширший діапазон дисперсії CEI в українській вибірці (0,787 проти 0,639) відображає суттєві відмінності між проєктами щодо зрілості комунікаційного governance, що може бути пов'язано з нерівномірним розвитком відповідних інституційних практик в умовах активного входження українських університетів у міжнародне академічне середовище.

**Висновки.** Розроблений data-driven інструмент – структурований онлайн-опитувальник з автоматизованим розрахунком CEI засобами Google Apps Script – дозволяє кількісно оцінити рівень комунікаційної ентропії в міжнародному консорціумі та ідентифікувати конкретні governance gaps, що потребують першочергової уваги. Практична цінність інструменту є подвійною: діагностична функція забезпечує оцінку комунікаційного стану консорціуму на будь-якому етапі його реалізації; управлінська функція – цільове фокусування ресурсів координатора на усунення виявлених розривів замість загальних рекомендацій «покращити комунікацію». Отримані результати підтверджують, що ефективність цифрових комунікаційних інструментів безпосередньо залежить від наявності governance-структур, які визначають правила їх використання. Перспективою подальших досліджень є розробка web-орієнтованого dashboard-рішення для онлайн-моніторингу комунікаційного governance консорціуму в режимі реального часу.

## Список використаних джерел


1. Tenhunen-Lunkka A., Honkanen R. Project coordination success factors in European Union-funded research, development and innovation projects under the Horizon 2020 and Horizon Europe programmes. Journal of Innovation and Entrepreneurship. 2024. Vol. 13. https://doi.org/10.1186/s13731-024-00363-x.
2. Mund J.-P., Wallor E., Khrutba V. et al. Formation of a digitalization culture in higher education institutions of Ukraine. CEUR Workshop Proceedings. 2024. https://ceur-ws.org/Vol-3966/W1Paper1.pdf.
3. Yousef K. Exploring the impact of cultural diversity in global projects: A comparative analysis of virtual and face-to-face teamwork. International Journal of Cross Cultural Management. 2024. Vol. 24(2). P. 411–430. https://doi.org/10.1177/14705958241253754.
4. Müller R., Pemsel S., Shao J. Organizational enablers for governance and governmentality of projects: A literature review. International Journal of Project Management. 2014. Vol. 32(8). P. 1309–1320. https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.03.007.
5. Provan K. G., Kenis P. Modes of network governance: Structure, management, and effectiveness. Journal of Public Administration Research and Theory. 2008. Vol. 18(2). P. 229–252. https://doi.org/10.1093/jopart/mum015.

# ЦИФРОВА ТВОРЧІСТЬ В ОСВІТНІХ ЦІЛЯХ В ЕПОХУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ГЕНЕРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ У GEMINI

**Осадча К.П.[1], Осадча М.В.[2]**
[1]Інститут цифровізації освіти Національної академії педагогічних наук України, м. Київ, Україна
[2]Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, м. Мелітополь (м. Запоріжжя), Україна

**Анотація.** Використання чатів зі штучним інтелектом (ChatGPT, Google Gemini, Claude, Microsoft Copilot, Perplexity AI та ін.), яке починалося з роботи з текстовою інформацією (спілкування, пошук ідей, генерація текстів тощо) швидко перейшло до роботи із зображеннями (розпізнавання, генерація тощо). Це не тільки зацікавило представників візуальних мистецтв, цифрових дизайнерів, а й педагогів. Адже скільки ілюстрацій, зображень, схем, візуалізацій різних понять, явищ, процесів потрібно знайти чи створити педагогу у процесі його професійної діяльності для представлення навчального матеріалу. Метою дослідження є вивчення здатності Gemini генерувати зображення різного змісту і складності та оцінювання результатів такої генерації викладачами. Це дозволить зрозуміти наскільки корисним може бути цей інструмент і чи можна його використовувати для виконання різних завдань у педагогічній діяльності.

**Ключові слова:** цифрова творчість, штучний інтелект, генерація зображень, підготовка вчителів.

# DIGITAL CREATIVITY FOR EDUCATIONAL PURPOSES IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: RESULTS OF THE EXPERIMENT WITH IMAGE GENERATION IN GEMINI

**Osadcha K.P.[1], Osadcha M.V.[2]**
[1]Institute for Digitalisation of Education of the National Academy of Educational Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Bohdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University, Zaporizhzhia, Ukraine

**Abstract.** The use of chats with artificial intelligence (ChatGPT, Google Gemini, Claude, Microsoft Copilot, Perplexity AI, etc.), which started from working with text information (communication, idea search, text generation, etc.), quickly moved on to working with images (recognition, generation, etc.). This has interested not only visual artists and digital designers, but also educators. After all, how many illustrations, images, diagrams, visualizations of various concepts, phenomena, processes does a teacher need to find or create in the process of his professional activity to present educational material? The research purpose is to study the ability of Gemini to generate images of various content and complexity and to evaluate the results of such generation by teachers. This will allow us to understand how useful this tool can be and whether it can be used to perform various tasks in pedagogical activity.

**Keywords:** digital creativity, artificial intelligence, image generation, teacher training.

**Вступ.** Нині візуальна культура зазнає радикальних змін під впливом інструментів генеративного штучного інтелекту (ГШІ) ШІ-чати, що здатні створювати ілюстрації, логотипи, персонажів і сюжетні композиції за текстовими описами, уже стали складовою професійної та освітньої практики в як дизайні такі поза його межами. Цьому також сприяло поширення різних моделей зображень типу Midjourney, Stable Diffusion, DALL·E 3, Gemini Image Generation тощо. Не випадково збільшилося дослідження можливостей цих моделей для різних цілей: порівняння можливостей людської та машинної творчості в дизайні корпоративної айдентики [1], дидактичний потенціал ШІ у навчанні майбутніх цифрових дизайнерів створенню ілюстрацій до книг [2], шляхи гармонійного поєднання людських досліджень і використання ШІ для відкриття нових творчих робочих процесів [3], роль промптингу в створенні зображень за допомогою чат-бота на базі ШІ [4] та ін. Переважна кількість досліджень зосереджені на студентах або дизайнерах, і не достатньо робіт

присвячено використанню генерації зображень педагогами та практично не досліджено як викладачі реагують на генерацію зображень різних типів.

**Мета роботи** – дослідити взаємодію викладачів з Gemini під час створення візуальних матеріалів різних типів в освітніх і наукових цілях та як вони оцінюють результати.

**Виклад основного матеріалу**. Під час експерименту викладачам було поставлено завдання, використовуючи запропоновані промпти, створити такі зображення: малюнок сучасного програміста, кілька ілюстрацій для презентації про архітектуру ЕОМ, логотип для Міжнародної конференції з інформаційно комунікаційних технологій, чотирипанельний комікс, який ілюструє розвиток квантових технологій.

Для цього були використані такі промпти:

1. Намалюй плоску ілюстрацію сучасного програміста, який розмірковує над розробкою коду, сидячи за ноутбуком та попиваючи каву. Використай жовтий і блакитний, градієнти.
2. Намалюй набір ілюстрацій для презентації про архітектуру електронно-обчислювальних машин (ЕОМ).
3. Створи логотип для Міжнародної конференції з інформаційно-комунікаційних технологій у дослідженнях та освіті, використовуй абстрактне мистецтво, простий та лаконічний дизайн.
4. Намалюй чотирипанельний комікс, який ілюструє розвиток квантових технологій.

Оцінки респондентів розподілилися таким чином: результати оцінювання ілюстрації сучасного програміста отримало в середньому 4.42 балів, ілюстрацій для презентації про архітектуру ЕОМ - 3.54, логотипу для Міжнародної конференції з інформаційно комунікаційних технологій - 3.25, чотирипанельного коміксу - 2.77. Проаналізуємо, чому такі результати.

За першим промптом серед 13 зображень 4 були з артефактами (3 руки або 2 чашки) (Рис. 1). Разом із тим, оцінка була викладачами поставлена достатньо висока.

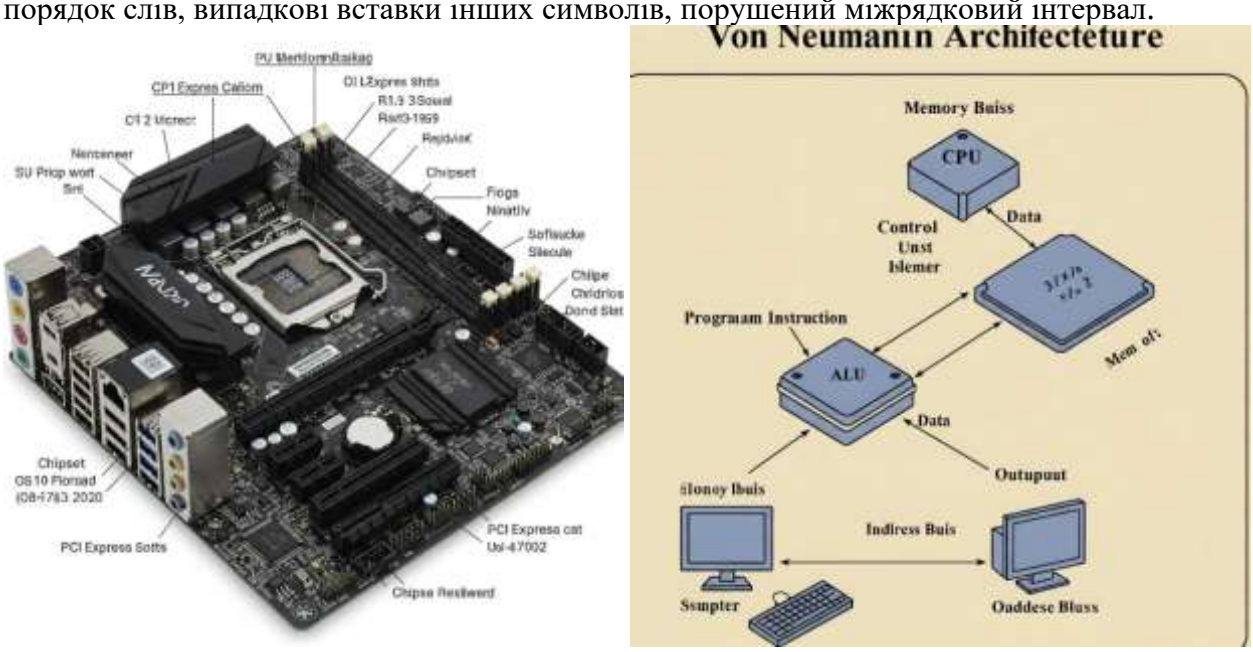


Рис. 1. Результати генерації зображення сучасного програміста, що містять артефакти

У результаті запиту щодо створення набору ілюстрацій для презентації про архітектуру ЕОМ Gemini не зміг запропонувати саме набір, тобто хоча б більше 1 ілюстрації. Серед 13 ілюстрацій найбільшу кількість займало зображення материнської плати з її компонентами або одного процесору (Рис. 2а). Один малюнок згенерував архітектуру фон Неймана (Рис. 2б). Проте через незрозумілі підписи цей малюнок також може вважатися невдалим.

У переважну більшість зображень, згенерованих як логотип конференції, Gemini намагався додати назву конференції англійською мовою. Хоча у запиті цього не вимагалося. Більшість логотипів виконані у стилі абстрактних мереж, графів, нейронів, геометричних фігур, точок і з'єднань як символів ІКТ, мереж, штучного інтелекту. Це відповідає тематиці конференції, і деякі концепти виглядають досить сучасно. Проте найбільшою проблемою стала робота з текстом (типографіка): у кожному з логотипів є численні орфографічні

помилки («Confeenierce», «Commnuction» тощо), незбалансований шрифт, неправильний порядок слів, випадкові вставки інших символів, порушений міжрядковий інтервал.




а б

Рис. 2. Результати генерації набору ілюстрацій для презентації про архітектуру ЕОМ

Наявні 2 логотипи без тексту не можуть бути якісними, саме через відсутність тексту, як пояснення до суті логотипу. Отже, жодне зі згенерованих зображень не може бути використане як професійний логотип конференції через критичні помилки у текстовій частині (Рис. 3), проте як генератор ідей і графічних концептів він може бути корисним.




Рис. 3. Результати генерації логотипу для Міжнародної конференції з інформаційно-комунікаційних технологій у дослідженнях та освіті

Завдання щодо малювання чотирипанельного коміксу, який ілюструє розвиток квантових технологій, виявилося для Gemini найскладнішим з усіх запропонованих. З 14 результатів лише 2 дійсно мають 4 малюнки, що властиво для чотирипанельного коміксу (Рис. 4). Інші містять ілюстрації у фотографічному стилі, а не в стилі мальованих коміксів, що частково відповідають або зовсім не відповідають темі запиту. Отже, один результат можна вважати таким, що повністю відповідає запиту.



Рис. 4. Результати генерації чотирипанельного комікcу, який ілюструє розвиток квантових технологій

**Висновки.** Отже, дослідження взаємодії викладачів з Gemini під час створення візуальних матеріалів різних типів в освітніх і наукових цілях дозволяє зробити такі висновки, що на період 2025 року модель Gemini, що використовувалась для генерації зображень достатньо добре впоралася з легкими завданнями, як створення ілюстрацій чи логотипу. Проте результати генерації сетів зображень чи чотирипанельного комікcу виявилися набагато гірші. Це відображено і в середніх оцінках викладачами цих результатів.

**Список використаних джерел**


1. Osadcha, K. P., & Osadcha, M. V. (2023). GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE VS HUMANS IN THE PROCESS OF CREATING CORPORATE IDENTITY ELEMENTS. Information Technologies and Learning Tools, 98(6), 212-230. https://doi.org/10.33407/itlt.v98i6.5494
2. Осадча, К., Алієв, М. (2023). Використання технологій штучного інтелекту для створення ілюстрацій до книг у професійній підготовці майбутніх цифрових дизайнерів. Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету. Серія: Педагогіка, 1(30), 136–144. https://doi.org/10.33842/22195203-2023-30-136-144.
3. Eric Zhou, Dokyun Lee, Generative artificial intelligence, human creativity, and art, PNAS Nexus, Volume 3, Issue 3, March 2024, pgae052. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae052.
4. Seli, P., Ragnhildstveit, A., Orwig, W., Bellaiche, L., Spooner, S., & Barr, N. (2025). Beyond the brush: Human versus artificial intelligence creativity in the realm of generative art. Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts. Advance online publication. https://doi.org/10.1037/aca0000743.

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОСВІТНІХ ПРОГРАМ НА ОСНОВІ NLP-АНАЛІЗУ РИНКУ ПРАЦІ ТА АРХІТЕКТУРИ СПІВПРАЦІ «ЛЮДИНА-ШІ»

**Осадча К.П. [1], Павленко В.М. [2], Петрова К.Г. [3], Нестеренко А.М.[4]**
[1]Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium
[2]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
[3]Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
[4]Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У роботі подано практичний досвід застосування інтелектуальних технологій для проєктування, оновлення та модернізації освітніх програм на прикладі галузі електроенергетики. Замість традиційних методів запропоновано підхід «освітня програма як IT-проєкт». Методологія базується на використанні NLP-конвеєра (NER на основі BERT, алгоритми TF-IDF, RAKE, семантична кластеризація) для інтелектуального аналізу понад 450+ вакансій ринку праці та автоматизованого бенчмаркінгу 14 українських і 28 закордонних магістерських програм. Описано практичний досвід залучення великих мовних моделей (GPT-4, Claude) як партнерів у гармонізації вимог, проєктуванні міждисциплінарних зав'язків, розробленні структури компетенцій, навчальних планів та оптимізації наповнення освітньої програми. Встановлено, що впровадження запропонованої архітектури дозволяє скоротити термін розроблення освітніх програм на 30–40%, суттєво підвищуючи їхню відповідність актуальним запитам ринку праці та зберігаючи за людиною контроль над стратегічними рішеннями.

**Ключові слова:** IT-проєкт, штучний інтелект, проектування освітніх програм, великі мовні моделі (LLM), NLP-аналіз ринку, бенчмаркінг, електроенергетика

# INTELLIGENT EDUCATIONAL PROGRAM DESIGN BASED ON NLP LABOR MARKET ANALYSIS AND HUMAN-AI COLLABORATION ARCHITECTURE

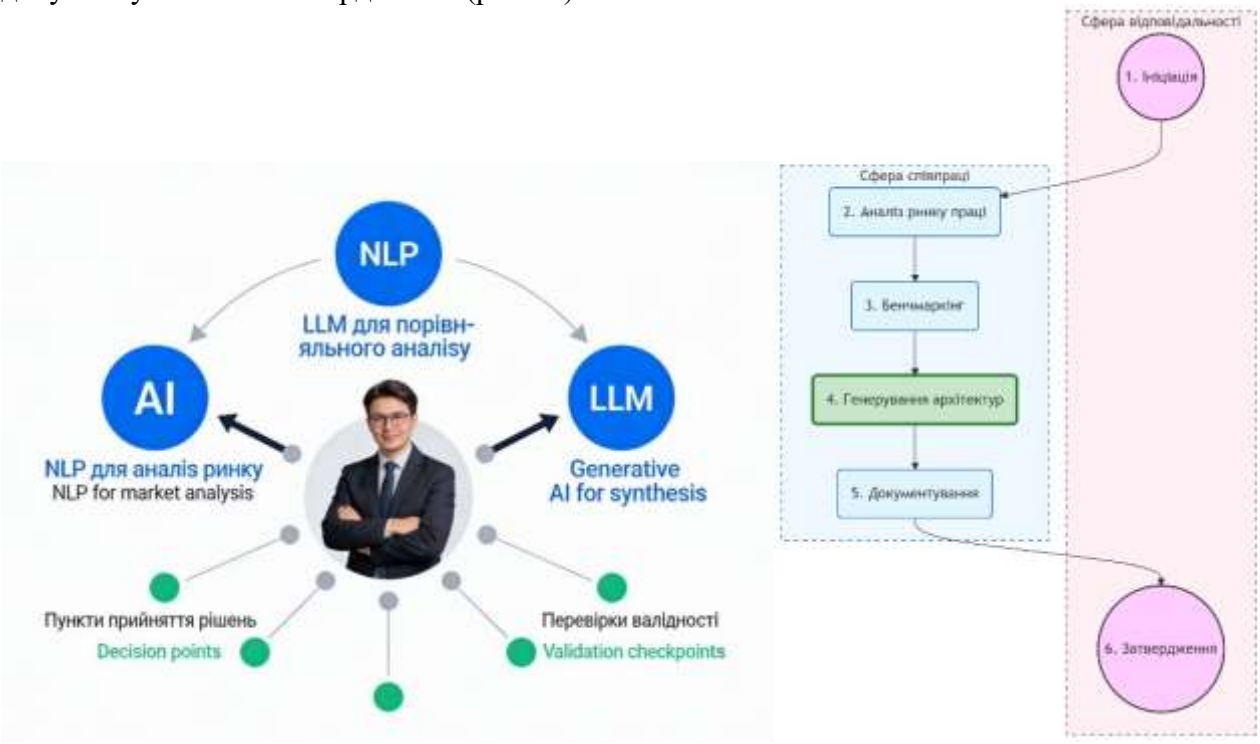
**Osadcha K.[1], Pavlenko V. [2], Petrova K. [3], Nesterenko A.[4]**
[1]Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium
[2]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine[3]
[4]Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper presents practical experience in the application of intelligent technologies for designing, updating, and modernizing educational programs, using the electric power engineering sector as a case study. Instead of traditional methods, an "educational program as an IT project" approach is proposed. The methodology is based on the implementation of an NLP pipeline (BERT-based NER, TF-IDF, RAKE algorithms, and semantic clustering) for the intelligent analysis of over 450 job vacancies and automated benchmarking of 14 Ukrainian and 28 foreign Master's programs. The study describes the practical involvement of Large Language Models (GPT-4, Claude) as partners in harmonizing requirements, designing interdisciplinary links, developing competence frameworks, constructing curricula, and optimizing educational content. It was established that the implementation of the proposed architecture reduces the development time of educational programs by 30–40%, significantly enhancing their alignment with current labor market demands while maintaining human control over strategic decision-making.

**Keywords**: IT project, artificial intelligence, educational program design, Large Language Models (LLM), NLP market analysis, benchmarking, electric power engineering

**Виклад основного матеріалу.** Традиційний підхід до розроблення освітніх програм (ОП) зазвичай базується на суб'єктивному досвіді робочої групи та фрагментарних опитуваннях стейкхолдерів. Так, під час проєктування, оновлення чи модернізації ОП використовується обмежена вибірка експертних думок та фрагментарний аналіз аналогів, що в умовах стрімкої цифрової трансформації енергетики (Smart Grid, IoT, хмарні платформи) призводить до розриву між освітою та ринком праці. У даній роботі пропонується трансформація процедури розроблення ОП у формат IT-проєкту (рис.1а), що складається з

шести послідовних фаз: ініціація, аналіз ринку праці, бенчмаркінг, генерування архітектур, документування та затвердження (рис.1б).




а) б)

Рис. 1. Структура інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (а) та етапи її реалізації (б) при розробленні ОП

**Мета роботи** полягає у розробленні та обґрунтуванні архітектури співпраці людино-ШІ [1] для проєктування міждисциплінарних ОП, що базується на трансформації традиційної методики їх створення у повноцінний ІТ-проєкт із застосуванням інструментів інтелектуального аналізу великих масивів даних (NLP-конвеєрів) та когнітивних можливостей великих мовних моделей.

Для реалізації поставленої мети здійснено поєднання можливостей сучасних ІТ-інструментів за рахунок впровадження котрих підсилювався кожен крок розроблення ОП. Практичне впровадження запропонованого підходу дозволило структурувати роботу за чітко визначеними ітераціями, де перші етапи фокусувалися на зборі та обробленні об’єктивних даних [2]. Практичне впровадження запропонованого підходу виглядало як послідовне виконання таких етапів:

Фаза 1-2 (Інтелектуальний аналіз даних). Для подолання суб’єктивізму на етапах аналізу було задіяно методи інтелектуального опрацювання великих масивів даних:

- NLP-аналіз ринку праці [3] (замість вибіркових опитувань реалізовано автоматизований конвеєр оброблення понад 450+ вакансій за напрямами електроенергетики, енергетичних систем, інтелектуальних енергетичних мереж тощо. Використання моделі BERT для ідентифікації сутностей (NER) та алгоритмів TF-IDF/RAKE дозволило виявити реальну структуру попиту на компетенції, зокрема високу вагу навичок роботи з розподіленими системами та інтелектуальними мережами [4]);

- Системний бенчмаркінг (за допомогою ШІ-інструментів проведено порівняння 28 закордонних та 14 українських магістерських програм. Це дозволило вийти за межі «поверхневого ознайомлення» та виявити структурні відмінності в академічному наповненні, що стали основою для подальшого проєктування.

Фаза 3 (Архітектура людино-ШІ співпраці). Ключовим етапом стало залучення великих мовних моделей (GPT-4, Claude) як когнітивних партнерів [5]. Авторами визначено чітку межу застосування ШІ:

1. Сфера відповідальності ШІ (опрацювання текстових масивів, пошук прихованих структур у даних, генерування альтернативних варіантів навчальних планів та формулювання компетенцій на основі виявлених «Gap-аналізом» прогалин);
2. Сфера відповідальності людини (ініціація проєкту, постановка цілей, прийняття ціннісних та політичних рішень, а також фінальне затвердження архітектури програми).

Такий підхід дозволяє людині виступати в ролі головного архітектора і замовником програми, відповідаючи за її концепцію та стратегічне бачення, тоді як ШІ виконує роль інтелектуального помічника-аналітика, який опрацьовує великі масиви даних та пропонує варіанти для прийняття рішень.

**Висновки.** Запропонований концептуальний підхід до формування освітніх програм дозволяє трансформувати традиційний процес, який часто ґрунтується на власній суб'єктивній думці вузького кола фахівців, на чітку та обґрунтовану послідовність дій з обробленням великих масивів даних про стан ринку праці, вимоги роботодавців та міжнародний досвід підготовки фахівців тощо. Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Впровадження методів автоматизованого інтелектуального аналізу текстових даних дозволяє перейти від обмежених емпіричних опитувань до системної обробки значних масивів актуальних вакансій. Це гарантує високий ступінь кореляції результатів навчання із реальними кваліфікаційними запитами сучасного високотехнологічного сектору економіки.

2. Диференціація функціональних ролей, де штучний інтелект виступає аналітичним інструментом обробки даних, а людина-експерт — стратегічним верифікатором та ідеологом, забезпечує інтенсифікацію процесу документального оформлення ОП при збереженні академічної якості та змістовної цілісності програми.

3. Використання великих мовних моделей як інтелектуальної підтримки прийняття рішень сприяє ідентифікації нових зв'язків між освітніми компонентами та створювати міждисциплінарні програми, які краще готують здобувачів до роботи з новітніми технологіями («розумні» мережі, інтернет речей тощо).

4. Подальший розвиток запропонованої методики вбачається у розробленні інтелектуальної системи динамічного моніторингу. Це дозволить здійснювати адаптивне коригування змісту освітніх програм у реальному часі відповідно до технологічних оновлень та змін нормативного поля, забезпечуючи сталу актуальність освітнього процесу без необхідності його повної реструктуризації.

## Список використаних джерел


1. Ferrario A., Nalin M. Towards Human-AI Collaboration in the Competency-Based Curriculum Development Process / A. Ferrario, M. Nalin // Education Sciences. 2024. Vol. 14, No. 6. P. 612. DOI: 10.3390/educsci14060612.
2. Pavlenko V. Creating Educational Products With Using Data Science and Digital Marketing / V. Pavlenko, I. Ponomarenko, O. Morhulets, A. Fedorchenko, O. Chorna, V. Pylypenko // 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312906.
3. Alshahrani A., Bown A., Bown R. Domain-specific NLP System to Support Learning Path and Course Recommendation for Computer Science and IT Students / A. Alshahrani, A. Bown, R. Bown // Computers and Education: Artificial Intelligence. 2023. Vol. 4. P. 100131. DOI: 10.1016/j.caeai.2023.100131.
4. Pavlenko V. Development and Marketing Promotion of the Educational Program Mobile Application in the Field of Electrical Engineering / V. Pavlenko, I. Ponomarenko, A. Fedorchenko, V. Onofriichuk, O. Chorna, V. Pylypenko // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). 2022. P. 1–5.
5. García-García J. Comparing AI-Generated Preview and Portfolio Feedback: GPT-4o and Claude 4 / J. García-García et al. // European Journal of AI Education. 2025. Vol. 2, No. 1. P. 1–15.

# ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ОЦІНКИ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ З АВТОМАТИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕСТОВИХ ПИТАНЬ НА ОСНОВІ ШАБЛОНІВ

**Сердюк О.А.**, **Красношлик Н.О.**, **Дідковський Р.М.**, **Піскун О.В.**
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

**Анотація.** У матеріалах роботи наводяться результати проектування та реалізації повноцінної інформаційної системи оцінки знань студентів, ключовою особливістю якої є автоматична генерація тестових питань на основі формалізованих шаблонів. Метою наукової роботи є усунення обмежень традиційних систем тестування, що спираються на фіксовані банки завдань, шляхом розробки механізму параметризованих шаблонів, здатних породжувати множину еквівалентних варіантів питань без використання ресурсомістких моделей штучного інтелекту. Основним завданням роботи є формалізація підходу до опису тестових завдань у вигляді спеціалізованої мови шаблонів TQL (Template Question Language), а також проектування та реалізація серверної і клієнтської частин системи. Об'єктом дослідження є процеси автоматизованої оцінки знань у веб-орієнтованих освітніх інформаційних системах; предметом дослідження – методи, моделі та алгоритмічні засоби проектування і реалізації системи оцінки знань з автоматичною генерацією тестових питань на основі шаблонів. Підтверджено, що застосування шаблонного підходу суттєво підвищує об'єктивність оцінювання та знижує ризики порушення академічної доброчесності без потреби у спеціалізованому апаратному забезпеченні.

**Ключові слова:** інформаційна система, оцінка знань, тестування, шаблон питання, генерація тестів, мова шаблонів.

# INFORMATION SYSTEM FOR STUDENT KNOWLEDGE ASSESSMENT WITH AUTOMATIC GENERATION OF TEST QUESTIONS BASED ON TEMPLATES

**Serdiuk O.**, **Krasnoshlyk N.**, **Didkowsky R.**, **Piskun O.**
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

**Abstract.** The paper presents the results of designing and implementing a full-featured student knowledge assessment information system whose key feature is the automatic generation of test questions based on formalized templates. The research aims to overcome the limitations of traditional testing systems that rely on fixed question banks by developing a mechanism of parameterized templates capable of producing multiple equivalent question variants without the use of resource-intensive artificial intelligence models. The main objective of the work is to formalize the approach to describing test tasks in the form of a specialized Template Question Language (TQL), as well as to design and implement both the server-side and client-side of the system. The object of the study is the process of automated knowledge assessment in web-oriented educational information systems; the subject of the study is the methods, models, and algorithmic tools for designing and implementing a knowledge assessment system with automatic template-based test question generation. It is confirmed that the template-based approach significantly improves assessment objectivity and reduces the risks of academic integrity violations without the need for specialized hardware infrastructure.

**Keywords:** information system, knowledge assessment, testing, question template, test generation, template language.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку освітніх інформаційних систем характеризується інтенсивною інтеграцією цифрових технологій у сферу контролю та оцінювання результатів навчання [1]. Широке поширення дистанційного навчання та зростання кількості здобувачів освіти зумовлюють необхідність створення масштабованих і методично обґрунтованих систем тестування. Наявні платформи – Canvas, Moodle, Blackboard Learn, Kahoot! – переважно ґрунтуються на використанні фіксованих банків тестових завдань [2, 3]. Такий підхід обмежує варіативність оцінювання та створює передумови для механічного заучування відповідей. Перспективним напрямом є автоматична генерація питань на основі штучного інтелекту, яку вже реалізовано у таких платформах, як Kahoot! AI та Quizlet Magic Notes [3, 4, 5]. Проте подібні рішення висувають підвищені вимоги до апаратного

забезпечення серверної інфраструктури, оскільки виконання великих мовних моделей потребує значних обчислювальних ресурсів, що суттєво збільшує вартість розгортання та експлуатації системи [3]. Альтернативним підходом є автоматична генерація тестових питань на основі формалізованих шаблонів, що дозволяє розглядати тестове завдання як параметризовану модель, здатну породжувати множину еквівалентних варіантів без залучення ШІ-інфраструктури.

**Мета роботи.** Метою роботи є теоретичне обґрунтування та практична реалізація повноцінної веб-орієнтованої інформаційної системи оцінки знань студентів, що базується на формалізованому описі тестових завдань у вигляді шаблонів і забезпечує автоматичну генерацію, валідацію та обробку тестових питань.

**Постановка задачі.** Традиційний підхід до створення тестів вимагає розробки великої кількості окремих варіантів одного завдання з різними числовими даними чи термінами, що є трудомістким і не гарантує повного охоплення предметної області [1, 4]. Запропонований підхід передбачає визначення шаблонів питань, у яких змінні частини позначаються конструкціями спеціалізованої мови TQL. Наприклад, шаблон «Який обсяг пам'яті займає масив, що містить \int(10,20) \term{цілих чисел|дійсних чисел|символів}?» при кожній генерації автоматично підставляє один із варіантів та визначає відповідну правильну відповідь. Це дозволяє одному шаблону породжувати значно більшу кількість унікальних варіантів питання, усуваючи можливість механічного запам'ятовування.

**Вирішення проблеми.** Розроблена мова TQL є спеціалізованою декларативною мовою, що містить кілька груп конструкцій. Генератори числових значень (\int(a,b), \float(a,b,p), \d, \d{n}, \d{m,n} тощо) забезпечують створення випадкових чисел у заданих діапазонах. Генератори термінів (\term{...}, \dict{...}, \select{n}{...}) реалізують випадковий вибір елементів із наперед визначених множин. Обчислювальні конструкції (\calc{вираз}) виконують математичні обчислення з підстановкою раніше згенерованих значень через систему посилань \N1, \V1, \R1. Умовна логіка (\if{умова}{так}{ні}) та валідація (\validate{умова}) забезпечують коректність і узгодженість згенерованих даних (табл. 1).

Таблиця 1

**Основні конструкції мови TQL та їх призначення**

| Конструкція | Призначення | Приклад |
|---|---|---|
| `\int(a,b)` | Ціле число у діапазоні | `\int(10,99) → 47` |
| `\float(a,b,p)` | Дробове число з точністю p | `\float(0,1,2) → 0.73` |
| `\term{...}` | Вибір терміну зі списку | `\term{Java\|Python} → Python` |
| `\dict{...}` | Вибір пари ключ-значення | `\dict{int:ціле\|str:рядок}` |
| `\calc{...}` | Обчислення виразу | `\calc{\N1 + \N2} → 61` |
| `\if{...}{...}{...}` | Умовна підстановка | `\if{\N1>50}{велике}{мале}` |

Серверна частина системи реалізована на основі асинхронного веб-фреймворку FastAPI для мови програмування Python [6] і побудована за принципом розділення відповідальності. Основними серверними модулями є: інтерпретатор мови TQL, що виконує лексичний та синтаксичний аналіз шаблону; генератор випадкових значень із рівномірним розподілом; обчислювач математичних виразів на основі безпечного виконання з обмеженим контекстом; менеджер шаблонів, що реалізує патерн Singleton для завантаження, індексування та кешування шаблонів із JSON-файлів; RESTful API з маршрутами для отримання списку шаблонів, генерації питань та перевірки відповідей. Клієнтська частина реалізована у вигляді односторінкового веб-застосунку (SPA) і забезпечує інтерфейс для трьох категорій користувачів: адміністратора системи, викладача та студента (рис. 1).

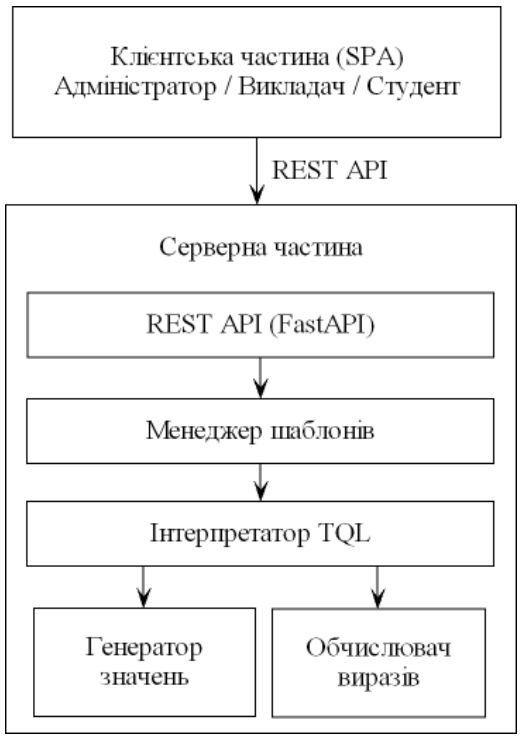


Рис. 1. Структура інформаційної системи

Шаблони зберігаються у форматі JSON та організовані в ієрархічну структуру за тематичними каталогами. Кожен шаблон містить метадані (ідентифікатор, тему, рівень складності), текст питання з конструкціями TQL, варіанти відповідей та інформацію про правильні відповіді. Клієнтський інтерфейс дозволяє викладачам створювати й редагувати шаблони в зручному візуальному середовищі з попереднім переглядом згенерованого питання, а студентам – проходити тести та отримувати миттєвий зворотний зв'язок щодо результатів.

**Висновок.** У ході проведеного дослідження розроблено повноцінну інформаційну систему оцінки знань студентів з автоматичною генерацією тестових питань на основі шаблонів, що включає серверну та клієнтську частини. Запропоновано та реалізовано спеціалізовану мову TQL, що дозволяє формалізувати структуру тестових завдань і автоматично породжувати необмежену кількість варіативних питань з одного шаблону. На відміну від систем генерації питань на основі штучного інтелекту, запропонований підхід не потребує значних апаратних ресурсів, що робить систему економічно доступною для закладів вищої освіти будь-якого масштабу. Показано, що застосування шаблонного підходу унеможливлює механічне заучування відповідей, підвищує об'єктивність оцінювання та сприяє дотриманню принципів академічної доброчесності.

## Список використаних джерел

1. Радкевич О.П. Інструменти EdTech для навчання та оцінювання: монографія. Київ: Видавництво Людмила, 2023. 220 с.
2. Kurdi G., Leo J., Parsia B., Sattler U., Al-Emari S. A Systematic Review of Automatic Question Generation for Educational Purposes // International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2020. Vol. 30. P. 121–204. https://doi.org/10.1007/s40593-019-00186-y
3. Willert N. Thiemann J. Template-Based Generator for Single-Choice Questions // Technology, Knowledge and Learning. 2024. Vol. 29. P. 355–370. https://doi.org/10.1007/s10758-023-09659-5.
4. Moodle. https://moodle.org.
5. Kahoot! https://kahoot.com.
6. FastAPI. Modern, fast web framework for building APIs with Python. https://fastapi.tiangolo.com.

# ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-РОЗРАХУНКОВИХ КОМПЛЕКСІВ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ДИСЦИПЛІНИ «РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ» СПЕЦІАЛЬНОСТІ J7 «ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

**Фалендиш А.[1], Клецька О.[1,2], Іванченко Д.[2], Лямзін А.[3], Kravchenko K.[4]**
[1]Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна
[2]ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Дніпро, Україна
[3]Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна
[4]Faculty of Mechanical Engineering, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

**Анотація**. В роботі розглянуто можливість використання інформаційно-розрахункових комплексів по визначенню параметрів рухомого складу залізниць, які були розроблені при виконанні наукових робіт, в навчальний процес дисципліни «Рухомий склад залізничного транспорту» по спеціальності J7 «Залізничний транспорт». Розроблені програмні комплекси пропонується використовувати при вивченні та виконанні практичних та лабораторних робіт та при самостійному вивченні матеріалу.
**Ключові слова**: Інформаційно-розрахунковий комплекс, рухомий склад, практична робота, самостійна робота, навчальний процес.

# IMPLEMENTATION OF INFORMATION AND COMPUTATIONAL COMPLEXES INTO THE EDUCATIONAL PROCESS OF THE DISCIPLINE “RAILWAY ROLLING STOCK” FOR SPECIALTY J7 “RAILWAY TRANSPORT”

**Falendysh A.[1], Kletska O.[1,2], Ivanchenko D.[2], Lyamzin A.[3], Kravchenko K.[4]**
[1]Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
[2]Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine
[3]Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine
[4]Faculty of Mechanical Engineering, University of Zilina, Zilina, Slovak Republic

**Abstract.** The paper considers the possibility of using information and computational complexes for determining the parameters of railway rolling stock, developed during scientific research activities, in the educational process of the discipline “Railway Rolling Stock” for specialty J7 “Railway Transport”. The developed software complexes are proposed for use in studying and performing practical and laboratory work, as well as for independent study of the educational material.
**Keywords:** information and computational complex, rolling stock, practical work, independent study, educational process.

**Вступ**. Розвиток та зміни в освітньому процесі потребує від викладачів та студентів своєчасно реагувати на ці зміни та зміни в суспільстві. У зв’язку з інтеграцією нашої країни в Євросоюз та веденням воєнних дій на території країни ряд освітніх програм зазнає змін. Але при цьому вони повинні відповідати прийнятим Стандартам вищої освіти України. В кожній спеціальності є обов’язкові компоненти освітньо-професійної програми циклу професійної підготовки які повинні вивчатись студентом не залежно від закладу вищої освіти та освітньої програми. Для спеціальності J7 «Залізничний транспорт» не залежно від назви освітньої програми таким освітнім компонентом являється дисципліна «Рухомий склад залізничного транспорту», яка може мати і інші інтерпретації назви. Тому впровадження у вивчення дисципліни розроблених інформаційно-розрахункових комплексів дозволить краще набути студентам програмні компетентності. Особливо представляє інтерес співробітництво в цьому питанні різних закладів вищої освіти нашої країни та країн Євросоюзу.

**Метою роботи є** обґрунтування доцільності використання існуючих інформаційно-розрахункових комплексів по рухомому складу при вивченні дисципліни «Рухомий склад залізничного транспорту» по спеціальності J7 «Залізничний транспорт».

**Постановка проблеми.** Впровадити у вивчення дисципліни «Рухомий склад залізничного транспорту» по спеціальності J7 «Залізничний транспорт» інформаційно-розрахункових комплексів по розрахунку рухомому складу, які розроблені у співпраці закладів вищої освіти нашої країни та країн Євросоюзу.

**Розв'язання проблеми**. У відповідності з законами України про вищу освіту [1] та наукову і науково-технічну діяльність [2] студенти повинні не тільки отримувати базові знання по спеціальності, а і використовувати їх в науковій та практичній роботі. Тому для кращого освоєння знань доцільно використовувати уже розроблені програмні продукти при виконанні наукових досліджень по визначенню параметрів та характеристик рухомого складу.

У національному університеті «Львівська політехніка» (НУ «ЛП») в освітньо-професійній програмі «Функціональність залізничного транспорту» серед обов'язкових компонентів освітньо-професійної програми в циклі професійної підготовки є дисципліна «Рухомий склад залізничного транспорту». Серед компетентностей, які повинен отримати студент при вивченні цієї дисципліни є: здатність розрізняти об'єкти залізничного транспорту та їх складові, визначати вимоги до їхньої конструкції, параметрів та характеристик (ФК2); здатність проведення вимірного експерименту з визначення параметрів та характеристик об'єктів залізничного транспорту, їх агрегатів, систем та елементів (ФК3) та здатність організовувати експлуатацію об'єктів залізничного транспорту, їх систем та елементів з обґрунтовуванням структури управління експлуатацією, технічного обслуговування та ремонту (ФК8). Основними програмними результатами навчання являються: ідентифікація об'єктів залізничного транспорту, їх систем, елементів, характеристик та параметрів з урахуванням спеціалізації (ПРН13); знання структури управління експлуатацією, технічним обслуговуванням та ремонтом об'єктів залізничного транспорту, їх систем та окремих елементів (ПРН19) [3].

Науковцями з НУ «ЛП», Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) та Східноукраїнського національного університету імені В. Даля була розроблена інформаційно-розрахункова система оцінки технічного рівня дизель-поїздів [4], яка може використовуватись при проведенні практичних робіт по визначенню основних параметрів моторвагонного рухомого складу і дозволить підвищити якість отримання компетенцій ФК2 та ФК3 і результатом навчання буде ПРН13. Для покращення знань з цих же компетенцій в частині визначення моторвагонного рухомого складу для переведення його на водневе паливо доцільно використовувати відповідну інформаційну автоматизовану систему, яка представлена в роботі [5].

Науковці Жилінського університету (Словакія) розробили ряд моделей по оцінці міцності конструкцій вагонів залізничного транспорту [6-7]. Дані комп'ютерні моделі доцільно використовувати при вивченні конструкції вагонів та його елементів та використовувати при проведенні практичних та лабораторних робіт. Це дозволить отримати студентам компетенції ФК2 та ФК3 і результатом навчання буде ПРН13.

Для покращення знань в компетенції ФК8 та відповідного результату навчання ПРН19 в частині експлуатації та обслуговування рухомого складу доцільно використовувати програмні продукти інформаційно-розрахункові комплекси, які розроблені науковцями НУ «ЛП» та УкрДУЗТ та наведені в роботах [8-9].

**Висновки**. Для підвищення ефективності отримання студентами компетенцій по дисципліні «Рухомий склад залізничного транспорту» спеціальності J7 «Залізничний транспорт» запропоновано використовувати розроблені інформаційно-розрахункові комплекси по рухомому складу залізниць при вивченні матеріалу на практичних та лабораторних роботах, а також при виконанні науково-дослідних робіт студентів.

## Список використаних джерел

1. Про вищу освіту: Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII - doc_info Документ 1556-VII, чинний, поточна ред. від 09.08.2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18 (дата звернення: 30.04.2026).

2. Про наукову і науково-технічну діяльність: Закон України від 26.11.2015 № 848-VIII Документ 848-VIII, чинний, поточна ред. від 16.07.2019. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ 848-19#Text (дата звернення: 30.04.2026).
3. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 273 «Залізничний транспорт» галузі знань 27 «Транспорт» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Наказ Міністерства освіти та науки України від 04.10.2018 р., №1067. 20 с.
4. Фалендиш А.П. Інформаційно-розрахункова система оцінки технічного рівня дизель-поїздів / А.П. Фалендиш, М.І. Брагін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля / Науковий журнал. Луганськ, вид. СНУ, 2011. №1 (155). Частина 2. С. 234-237.
5. Automated system of selection multiple units rolling stock rolling stock for conversion to hydrogen fuel / A. Falendysh, N. Chygyryk, O. Kosarev // Збірник наук. праць УкрДУЗТ . Харків: УкрДУЗТ. 2018. Вип.175. С.12-23.
6. Research into the loading of the tank car frame concept with filler in the composite center sill. O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, K. Kravchenko COMMUNICATIONS 2022/3, 24 (3), B219-B227. https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B219-B227
7. Calculation of Basic Indicators of Running Safety on the Example of a Freight Wagon with the y25 BogieJ Dižo, M Blatnický, D Molnár, A Falendysh COMMUNICATIONS 2022/3, 24 (3), B259-B266. https://doi.org/10.26552/com.C.2022.3.B259-B266
8. Автоматизована система визначення міжремонтних пробігів для модернізованих маневрових тепловозів ЧМЕ3 / АВ Клименко, АП Фалендиш, ВО Гатченко, МА Барибін // Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. К.: ДУІТ. 2019. Вип.33. Т.1. С. 21-32.
9. Фалендиш, А.П. Програмний комплекс вибору системи технічної експлуатації маневрового тепловозу [текст] / А.П. Фалендиш, А.Л. Сумцов, О.В. Артеменко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2016. №1. С. 54-61.

# ВИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ВЕБДОСТУПНОСТІ ЦИФРОВИХ ОСВІТНІХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

**Франчук В.М.[1], Юрійчук А.О.[2]**
[1] Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна
[2] Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

**Анотація**. У роботі досліджено проблему забезпечення вебдоступності цифрових освітніх ресурсів в умовах воєнного стану в Україні. Визначено специфічні виклики, що виникають у зв'язку з нестабільним інтернет-з'єднанням, перебоями електропостачання та переважним використанням мобільних пристроїв. Метою дослідження є визначення специфічних викликів вебдоступності цифрових освітніх ресурсів в умовах воєнного стану та обґрунтування технологічних підходів до їх подолання. Запропоновано підхід до забезпечення вебдоступності цифрових освітніх ресурсів, що поєднує технічну доступність, інфраструктурну стійкість та педагогічну інклюзивність. Проаналізовано принципи мобільно-орієнтованого дизайну, концепцію офлайн-доступу на основі Progressive Web Apps та вимоги стандарту WCAG 2.2 щодо взаємодії з інтерфейсами в умовах сенсорного введення. Результати можуть бути використані для підвищення стійкості та інклюзивності цифрового освітнього середовища.

**Ключові слова**: вебдоступність, воєнний стан, мобільний доступ, Progressive Web Apps, WCAG, цифрові освітні ресурси.

# CHALLENGES AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR WEB ACCESSIBILITY OF DIGITAL EDUCATIONAL RESOURCES UNDER MARTIAL LAW

**Franchuk V.[1], Yuriichuk A.[2]**
[1] Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine
[2] Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

**Abstract**. The paper investigates the problem of ensuring web accessibility of digital educational resources under martial law in Ukraine. Specific challenges related to unstable internet connectivity, power outages, and predominant use of mobile devices are identified. The purpose of the study is to identify specific challenges of web accessibility of digital educational resources under martial law and to substantiate technological approaches to overcoming them. An approach to ensuring web accessibility of digital educational resources, combining technical accessibility, infrastructural resilience and pedagogical inclusiveness, is proposed. The principles of mobile-first design, the offline access concept based on Progressive Web Apps, and WCAG 2.2 requirements for touch-based interaction are analysed. The results can be used to improve the resilience and inclusiveness of the digital educational environment.

**Keywords**: web accessibility, martial law, mobile access, Progressive Web Apps, WCAG, digital educational resources.

**Вступ**. Після повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну в лютому 2022 року докорінно змінилися умови функціонування закладів вищої освіти. Дистанційне навчання стало вимушеним форматом для мільйонів здобувачів освіти і викладачів. Водночас систематичні удари по енергетичній інфраструктурі країни призвели до масових і тривалих відключень електроенергії, що безпосередньо вплинуло на якість інтернет-з'єднання. У таких умовах питання вебдоступності цифрових освітніх ресурсів набуло принципово нового виміру: йдеться вже не лише про забезпечення рівних, а й про базову доступність навчання для широкого кола здобувачів, які опинились в умовах нестабільної цифрової інфраструктури.

**Мета роботи**. Узагальнення специфічних викликів вебдоступності цифрових освітніх ресурсів, що виникають в умовах воєнного стану, та визначення технологічних підходів до їх подолання.

**Постановка задачі**. Стандарт WCAG 2.2 (Web Content Accessibility Guidelines) визначає чотири ключові принципи доступного вебконтенту: сприйнятність, керованість,

зрозумілість та сумісність [1]. Ці принципи розроблялись передусім з урахуванням потреб осіб з постійними фізичними чи когнітивними порушеннями. Однак в умовах воєнного стану до них додаються ситуативні обмеження, що охоплюють значно ширшу аудиторію. Перебої електропостачання тривалістю 4–12 годин на добу, характерні для українських міст упродовж 2022–2026 рр., фактично перетворюють смартфон на основний засіб доступу до навчальних матеріалів. Це принципово змінює вимоги до освітніх вебресурсів: вони мають бути оптимізовані для мобільного доступу, стійкі до низької пропускної здатності каналу зв'язку та забезпечувати можливість роботи в офлайн-режимі.

**Основна частина**. На основі аналізу специфічних умов функціонування цифрового освітнього середовища в Україні під час воєнного стану запропоновано систематизацію ключових викликів вебдоступності цифрових освітніх ресурсів та технологічних підходів до їх подолання, табл.1.

Таблиця 1

**Систематизація технологічних підходів забезпечення вебдоступності цифрових освітніх ресурсів в умовах воєнного стану**

| Виклик | Вплив на доступність | Технологічні підходи |
|---|---|---|
| Домінування мобільних пристроїв | Ускладнення навігації та взаємодії з інтерфейсом | Mobile-first дизайн, адаптивний інтерфейс, сенсорні елементи керування |
| Нестабільне інтернет-з'єднання | Повільне завантаження або недоступність контенту | Оптимізація обсягу вебресурсу, поетапне завантаження контенту, текстові альтернативи |
| Відсутність стабільного доступу до мережі | Втрата безперервного доступу до навчального контенту | Progressive Web Apps (PWA), кешування контенту, офлайн-доступ |
| Недоступність PDF-документів | Ускладнення роботи зі скрінрідерами та мобільними пристроями | Структуровані PDF-документи, альтернативний текст, логічна структура документа |

Запропонований підхід до забезпечення вебдоступності цифрових освітніх ресурсів в умовах воєнного стану ґрунтується на поєднанні трьох взаємопов'язаних компонентів: технічної доступності, інфраструктурної стійкості та педагогічної інклюзивності. Такий підхід дозволяє розглядати вебдоступність не лише як відповідність критеріям WCAG 2.2, а і як здатність цифрового освітнього ресурсу забезпечувати безперервний доступ до навчального контенту в умовах нестабільної цифрової інфраструктури.

Перший виклик, представлений у табл. 1, пов'язаний із домінуванням мобільних пристроїв як основного засобу доступу до освітнього контенту. В умовах обмеженого доступу до стаціонарних комп'ютерів і нестабільного електропостачання смартфон стає основним навчальним пристроєм [2, 3]. Це актуалізує принципи мобільно-орієнтованого дизайну (mobile-first): адаптивні макети, великі сенсорні елементи інтерфейсу (відповідно до критерію WCAG 2.2 SC 2.5.8 – мінімум 24×24 CSS пікселі), уникнення дрібного тексту та взаємодій, що потребують використання маніпулятора типу «миша». Ресурси, спроєктовані без урахування мобільного контексту, автоматично стають недоступними для значної частини здобувачів освіти – навіть тих, хто не має жодних постійних порушень здоров'я.

Другий виклик стосується нестабільності інтернет-з'єднання та низької пропускної здатності каналів зв'язку. Пошкодження телекомунікаційної інфраструктури в результаті ракетних ударів, перевантаження мереж під час укриття населення у бомбосховищах та технічні обмеження мобільних мереж у прифронтових районах призводять до суттєвого погіршення якості інтернет-з'єднання. Вебресурс, перевантажений графічним вмістом без

альтернативного тексту, некомпресованими відеоматеріалами без субтитрів або складними інтерактивними елементами, які потребують швидкого з'єднання, – у таких умовах просто не завантажується. Принцип оптимізації обсягу вебресурсу, що передбачає мінімізацію розміру сторінки, поетапне завантаження контенту та надання текстових альтернатив для всіх медіаматеріалів, стає не лише рекомендацією, а умовою функціональності ресурсу [4].

Третій виклик пов’язаний із необхідністю забезпечення офлайн-доступу до навчальних матеріалів. Використання технології Progressive Web Apps (PWA) дозволяє кешувати навчальний контент на пристрої користувача та забезпечувати доступ до нього без інтернет-з’єднання завдяки механізму фонових скриптів браузера. Дослідження у сфері мобільного навчання показують, що застосунки з офлайн-режимом демонструють суттєво вищий рівень залучення здобувачів освіти у середовищах з нестабільним інтернетом [5]. Водночас PWA, відповідно до специфікації W3C, має повною мірою відповідати вимогам WCAG, що робить цей підхід комплексним з точки зору як доступності, так і стійкості до перебоїв [6]. LMS Moodle, зокрема, отримала підтвердження відповідності WCAG 2.2 рівень AA у квітні 2025 року та підтримує офлайн-режим роботи, що робить її особливо цінним інструментом в українських реаліях.

Окремим аспектом є проблема доступності PDF-документів – найпоширенішого формату навчальних матеріалів в українських університетах. Більшість PDF-файлів створюються без дотримання базових принципів доступності: без структурних тегів, без логічної послідовності читання для скрінрідерів, без альтернативного тексту до зображень. У звичайних умовах це є проблемою переважно для осіб з порушеннями зору. В умовах воєнного стану до цієї групи додаються здобувачі освіти, які вимушені навчатися у бомбосховищах зі слабким освітленням та в умовах стресу, для яких чітка структура і текстові альтернативи є критично важливими. Вирішення цієї проблеми потребує формування у викладачів навичок створення доступних документів та впровадження інституційних вимог до завантажуваних матеріалів.

**Висновок**. Воєнний стан в Україні сформував специфічне освітнє середовище, в якому традиційні виклики вебдоступності поглиблюються ситуативними технічними обмеженнями, що охоплюють значно ширше коло здобувачів освіти. Встановлено, що ефективне забезпечення вебдоступності освітніх ресурсів у таких умовах потребує комплексного поєднання мобільно-орієнтованого дизайну, технологій офлайн-доступу на основі PWA, оптимізації обсягу вебресурсів і підготовки викладачів до створення структурованих та доступних навчальних матеріалів. Запропонований підхід дозволяє комплексно розглядати вебдоступність цифрових освітніх ресурсів в умовах воєнного стану з урахуванням технічних, інфраструктурних та педагогічних аспектів. Окреслені підходи є універсальними з точки зору міжнародних стандартів доступності та водночас відповідають специфічним умовам, у яких функціонує українська вища освіта.

## Список використаних джерел


1. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2. (2023). W3C Recommendation. URL: https://www.w3.org/TR/WCAG22/
2. Where AI Meets Accessibility: Considerations for Higher Education. (2024). Every Learner Everywhere. URL: https://www.everylearnereverywhere.org/resources/where-ai-meets-accessibility-considerations-for-higher-education/
3. Триус, Ю., Франчук, В., & Франчук, Н. (2011). Організаційні й технічні аспекти використання систем мобільного навчання. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2. Комп’ютерно-орієнтовані системи навчання*, *12*(19), 53–62.
4. Low-Bandwidth Learning Design for Global Audiences. (2026). eLearning Industry. URL: https://elearningindustry.com/low-bandwidth-learning-design-for-global-audiences.
5. Umar, I., & Argungu, K. A. (2025). Offline Capable Mobile Learning Solutions for Low Connectivity Regions. *International Journal of Sustainable Social Science (IJSSS)*, *3*(5), 337–354. https://doi.org/10.59890/ijsss.v3i5.107
6. Roumeliotis, K. I., & Tselikas, N. D. (2022). Evaluating Progressive Web App Accessibility for People with Disabilities. *Network*, *2*(2), 350–369. https://doi.org/10.3390/network2020022

# ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ З ПРИКЛАДНОЇ ЛІНГВІСТИКИ

**Франчук Н.П.**
Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

**Анотація**. У тезах розглянуто можливості використання інформаційних технологій, веборієнтованих платформ та інструментів штучного інтелекту у підготовці майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі цифрових технологій у професійній діяльності прикладних лінгвістів, зокрема в галузях автоматизованого перекладу, аналізу текстових даних, опрацювання природної мови та створення цифрових мовних ресурсів. Метою роботи є аналіз сучасних інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту, що можуть бути інтегровані у процес підготовки майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики. Об'єктом дослідження є процес професійної підготовки майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики. Предметом дослідження є використання інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту в освітньому процесі підготовки майбутніх прикладних лінгвістів. У роботі використано методи аналізу наукових джерел, узагальнення сучасного досвіду використання цифрових технологій в освіті та систематизації засобів штучного інтелекту. Визначено основні напрями застосування веборієнтованих систем, платформ дистанційного навчання, хмарних сервісів та генеративного штучного інтелекту в освітньому процесі. Показано перспективність використання цифрових технологій для формування професійних компетентностей майбутніх прикладних лінгвістів.

**Ключові слова**: інформаційні технології, штучний інтелект, прикладна лінгвістика, веборієнтовані системи, цифрові платформи, генеративний штучний інтелект, цифрові компетентності.

# THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN THE TRAINING OF FUTURE SPECIALISTS IN APPLIED LINGUISTICS

**Franchuk N.P.**
Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

**Abstract**. This paper investigates the possibilities of the application of information technologies, web-based platforms, and artificial intelligence tools in the training of future specialists in applied linguistics. The relevance of the study stems from the growing role of digital technologies in the professional activities of applied linguists, particularly in the fields of machine translation, text data analysis, natural language processing, and the creation of digital language resources. This study aims to analyse modern information technologies and artificial intelligence tools that can be integrated into the training process for future specialists in applied linguistics. The object of the study is the professional training process for future specialists in applied linguistics. The subject of the study is the use of information technologies and artificial intelligence tools in the educational process of training future applied linguists. The study employs methods of analysing scientific sources, summarizing current experience in the use of digital technologies in education, and systematizing artificial intelligence tools. The main areas of application of web-based systems, distance learning platforms, cloud services, and generative artificial intelligence in the educational process are identified. The potential of using digital technologies for the development of professional competencies of future applied linguists is demonstrated.

**Keywords**: information technology, artificial intelligence, applied linguistics, web-based systems, digital platforms, generative artificial intelligence, digital competencies.

**Вступ**. Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту суттєво впливають на зміст професійної діяльності сучасних фахівців з прикладної лінгвістики. Автоматизований переклад, аналіз природної мови, опрацювання текстових даних, створення мовних корпусів та використання інтелектуальних інформаційних систем стають невіддільною складовою роботи перекладачів, аналітиків мовних даних та фахівців з комп'ютерної лінгвістики. У

зв’язку з цим виникає необхідність інтеграції сучасних інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту у професійну підготовку майбутніх фахівців. Сучасний етап розвитку освіти характеризується активною цифровізацією освітнього процесу, інтеграцією технологій штучного інтелекту, веборієнтованих платформ та хмарних сервісів у професійну підготовку фахівців. Особливої актуальності набуває проблема підготовки майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики, діяльність яких безпосередньо пов’язана з використанням інформаційних технологій, автоматизованих систем опрацювання тексту, комп’ютеризованого перекладу та цифрових інструментів аналізу мовних даних [1], [2].

Підготовка таких фахівців потребує створення цілісної методичної системи навчання інформатичних дисциплін, орієнтованої на формування професійних і цифрових компетентностей, розвиток алгоритмічного мислення та здатності використовувати сучасні цифрові технології у професійній діяльності.

**Мета роботи**. Метою роботи є проаналізувати можливості використання інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту в підготовці майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики та визначити напрями їх інтеграції в освітній процес.

**Постановка задачі.** Одним із актуальних напрямів цифрової трансформації освіти є впровадження інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту у професійну підготовку фахівців різних галузей. Для спеціальності «Прикладна лінгвістика» особливого значення набуває використання веборієнтованих платформ, систем управління навчанням, хмарних сервісів, технологій опрацювання природної мови та генеративного штучного інтелекту. Проте питання їх комплексного використання в освітньому процесі потребує подальшого аналізу. Тому актуальним завданням є дослідження можливостей використання сучасних інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту щодо підтримки навчальної діяльності, автоматизації роботи з мовними даними та формування професійних компетентностей майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики.

**Вирішення проблеми.** Підготовка майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики в умовах цифрової трансформації освіти потребує активного використання сучасних інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту. Це зумовлено зростанням обсягів цифрових мовних даних, розвитком технологій опрацювання природної мови та поширенням інтелектуальних систем, які використовуються у професійній діяльності прикладних лінгвістів.

Одним із важливих напрямів є використання веборієнтованих платформ і систем управління навчанням, через які забезпечується доступ до навчальних ресурсів, організація змішаного та дистанційного навчання, підтримка комунікації між учасниками освітнього процесу та автоматизація контролю результатів навчання. З таких систем утворюється єдине цифрове освітнє середовище, що сприяє персоналізації навчання [3], [4], [5].

Важливу роль у підготовці майбутніх прикладних лінгвістів відіграє використання хмарних технологій, через які забезпечується колективна робота над проєктами, зберігання та опрацювання даних, використання спеціалізованого програмного забезпечення без необхідності встановлення його на локальні пристрої. Використання хмарних сервісів підвищує мобільність освітнього процесу та сприяє розвитку навичок командної роботи [6].

Перспективним напрямом є застосування інструментів штучного інтелекту та генеративних моделей для виконання професійно орієнтованих завдань. Зокрема, аналіз часових тенденцій неухильно зростає з піком в останні роки, а саме: Китай, Індія, Сполучені Штати є провідними країнами в дослідженнях ШІ в онлайн-навчанні та дистанційній освіті. Особлива увага приділяється алгоритмічним онлайн-освітнім просторам, етиці та людській діяльності, а також онлайн-навчанню через виявлення, ідентифікацію, розпізнавання та прогнозування [7], [8]. Зокрема, такі інструменти можуть також використовуватися для автоматизованого перекладу, аналізу текстів, створення навчального контенту, узагальнення даних, формування прикладів і підтримки дослідницької діяльності студентів. Їх використання дозволяє підвищити ефективність роботи з текстовими даними та розширити можливості індивідуалізації навчання. Також Організація економічного співробітництва та

розвитку (ОЕСР) сприяє збиранню даних, аналізу та передового досвіду в державній політиці. Вона співпрацює з понад 100 країнами світу, щоб побудувати сильніші, справедливіші та чистіші суспільства, допомагаючи формувати кращу політику для кращого життя [9].

Водночас особливого значення набувають технології опрацювання природної мови, використання яких забезпечує автоматичний аналіз текстів, класифікацію документів, визначення тональності повідомлень, побудову мовних корпусів, розпізнавання мовлення та інші операції з мовними даними. Ознайомлення здобувачів освіти із сучасними NLP-технологіями сприяє формуванню професійних компетентностей, необхідних для роботи в галузях комп'ютерної лінгвістики, автоматизованого перекладу та аналізу даних.

Таким чином, комплексне використання веборієнтованих платформ, хмарних сервісів, технологій опрацювання природної мови та інструментів штучного інтелекту створює умови для підвищення якості професійної підготовки майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики, розвитку їхніх цифрових компетентностей та готовності до професійної діяльності в умовах цифрового суспільства.

**Висновок.** Використання інформаційних технологій та інструментів штучного інтелекту є важливим чинником модернізації підготовки майбутніх фахівців з прикладної лінгвістики. Інтеграція веборієнтованих систем, платформ дистанційного навчання, хмарних сервісів, технологій опрацювання природної мови та генеративного штучного інтелекту створює умови для підвищення якості професійної підготовки та формування актуальних цифрових компетентностей.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням моделей використання генеративного штучного інтелекту в навчанні прикладної лінгвістики та дослідженням ефективності таких технологій у закладах вищої освіти.

## Список використаних джерел


1. Ваховська О.В. (2023). Основи комп'ютерної лінгвістики: навчально-методичний посібник. Київ: Видавничий центр КНЛУ, 112 с. URL: http://rep.knlu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/787878787/3115/Ваховська_Основи%20комп%27ютерної%20лінгвістики_посібник%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
2. Франчук Н. П. (2024). Особливості впровадження комп'ютерних технологій у підготовку майбутніх прикладних лінгвістів. Науковий часопис УДУ імені Михайла Драгоманова. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи. Випуск 102'2024. С. 92-95, https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.102.19
3. Франчук Н. П. (2025). Інтеграція автоматизованих технологій та штучного інтелекту в навчанні майбутніх прикладних лінгвістів. *Міждисциплінарні дослідження складних систем*. С. 139-146. https://doi.org/10.31392/iscs.2025.27.139
4. Коваль О., Умрик М. (2024). Використання штучного інтелекту для автоматизації процесу створення освітніх тестів. Міждисциплінарні дослідження складних систем. № 24 (2024). С. 78-96, https://doi.org/10.31392/iscs.2024.24.078
5. Савіцька В. (2022). Цифровізація освітнього процесу у закладах вищої освіти: ризики і перспективи в сучасних умовах. *Засоби навчальної та науково-дослідної роботи*. № 59. С. 76–85, https://doi.org/10.34142/2312-1548.2022.59.07.
6. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. W3C Recommendation. URL: https://www.w3.org/TR/WCAG21/.
7. Dogan M. E., Goru Dogan T., Bozkurt A. (2023). The Use of Artificial Intelligence (AI) in Online Learning and Distance Education Processes: A Systematic Review of Empirical Studies. Applied Sciences. No 13 (5). P. 3056, https://doi.org/10.3390/app13053056
8. O'Hagan Clare. AI: UNESCO mobilizes education ministers from around the world for a co-ordinated response to ChatGPT. URL: https://www.unesco.org/en/articles/ai-unesco-mobilizes-education-ministers-around-world-co-ordi-nated-response-chatgpt
9. OECD. URL: https://www.oecda.org/

# СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ЗДОРОВ'Я ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

**Черненко В.П.[1], Карабанов Є.О.[1], Коноваленко Т.В.[2,3]**
[1]Комунальний заклад вищої освіти
"Кременчуцька гуманітарно-технологічна академія"
Полтавської обласної ради, Кременчук, Україна
[2]Мелітопольський державний педагогічний університет
імені Богдана Хмельницького, Україна
[3]Ризький технічний університет, Лієпайська академія, Латвія

**Анотація.** У роботі представлено результати впровадження автоматизованої системи моніторингу та корекції фізичного стану здобувачів вищої освіти у межах корпоративної екосистеми закладу вищої освіти. Досліджено використання хмарних скриптів для інтеграції корпоративної пошти та інструментів збору даних. Основна увага приділена статистичному доведенню ефективності системи за допомогою непараметричних критеріїв. Встановлено, що використання автоматизованої розсилки персоналізованих рекомендацій призводить до статистично значущої нормалізації індексу маси тіла здобувачів вищої освіти. За допомогою кореляційного аналізу Спірмена підтверджено пряму залежність між регулярністю взаємодії з алгоритмами моніторингу та позитивною динамікою антропометричних показників.

**Ключові слова:** вища освіта, цифровізація, автоматизована розсилка, ІМТ, кореляція Спірмена.

# STATISTICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HEALTH MONITORING DIGITALIZATION FOR HIGHER EDUCATION STUDENTS

**Chernenko V. P.[1], Karabanov Ye.O.[1], Konovalenko T.V.[2,3]**
[1]Communal Institution of Higher Education
"Kremenchuk Humanitarian and Technological Academy"
of the Poltava Regional Council, Kremenchuk, Ukraine
[2]Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University, Ukraine
[3]Fellow at Riga Technical University Liepaja Academy, Latvia

**Abstract.** The paper presents the results of implementing an automated system for monitoring and correcting the physical state of students within the corporate ecosystem of a higher education institution. The use of cloud scripts for integrating corporate email and data collection tools is investigated. The main focus is on the statistical proof of the system's effectiveness using non-parametric tests. It was established that the use of automated distribution of personalized recommendations leads to a statistically significant normalization of the body mass index of students. Using Spearman's correlation analysis, a direct relationship between the regularity of interaction with monitoring algorithms and positive dynamics of anthropometric indicators was confirmed.

**Keywords:** higher education, digitalization, automated emails, BMI, Spearman's correlation.

**Вступ.** У сучасних закладах вищої освіти (ЗВО) цифровізація охоплює не лише навчальні плани, а й системи управління добробутом здобувачів освіти. Наявність уніфікованої корпоративної пошти створює ідеальні умови для розгортання автоматизованих рішень для моніторингу здоров'я. Актуальність роботи зумовлена необхідністю переходу від загальних настанов до персоналізованих траєкторій здоров'язбереження, що базуються на об'єктивних даних (ІМТ) та алгоритмізованому фідбеку.

Аналіз міжнародного наукового дискурсу свідчить про високу ефективність цифрових втручань (Digital Health Interventions) для корекції способу життя здобувачів вищої освіти. У новітньому систематичному огляді T. Y. Lee та ін. [1] на основі метааналізу доведено, що автоматизовані цифрові платформи є дієвим засобом підвищення фізичної активності серед

студентів. Дослідження S. Jiang та співавторів [2] підтверджує, що рівень електронної медичної грамотності (eHealth literacy) студентів прямо корелює з їхньою залученістю до фізичної активності під впливом ІТ-інструментів.

Дослідження D. Magoc та ін. [3] на основі рандомізованих контрольованих досліджень підтверджує ефективність веборієнтованих систем для підвищення рівня навантаження порівняно з традиційними методами. Вплив загальної цифровізації освітнього середовища ЗВО на студентів детально досліджено у публікації V. Potočan [4]. O. Castro та ін. [5] у своєму метааналізі довели здатність мобільних та автоматизованих технологій формувати довготривалі звички до занять спортом у молоді.

Окрему увагу моніторингу маси тіла та ожиріння за допомогою алгоритмізованих втручань приділено в ґрунтовному дослідженні Y. Wang та ін. [6], де підтверджено статистичну значущість цифрової підтримки. Ефективність застосування персоналізованих цифрових скриптів для корекції нутриціологічної поведінки (режим харчування) доводиться результатами систематичного огляду K. Villinger та ін. [7]. Крім того, N. Feter та ін. [8] встановили, що цифровий фідбек значно підвищує мотивацію молоді до збереження здоров'я. Водночас питання розгортання таких систем безпосередньо у корпоративному хмарному середовищі ЗВО та перевірка їхньої дієвості потребують глибшого вивчення.

**Мета роботи.** Наукове обґрунтування та статистичне підтвердження ефективності автоматизованої системи моніторингу фізичного стану здобувачів вищої освіти, побудованої на базі хмарних скриптів, у межах корпоративної ІТ-інфраструктури ЗВО.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи контролю фізичного стану здобувачів освіти в ЗВО страждають від фрагментарності даних. Необхідно розробити архітектуру для безперервного циклу «вхідне опитування – автоматична рекомендація – моніторинг» через корпоративну пошту; за допомогою непараметричних методів довести, що системна цифрова взаємодія корелює з покращенням показників ІМТ.

**Основна частина.** На першому етапі через хмарні форми збирався реєстр імейлів та базові антропометричні дані; скрипт автоматично розраховував вхідний ІМТ. На формувальному етапі система генерувала та надсилала на корпоративну пошту листи з індивідуальними рекомендаціями, що базуються на протоколах фізичної активності ВООЗ, деталізованих у дослідженні F. C. Bull та ін. [9]. Збір динаміки здійснювався через щомісячні автоматизовані опитування.

Для перевірки однорідності груп на констатувальному етапі використано критерій $\chi^2$ Пірсона [10]. Встановлено, що вихідний розподіл студентів за категоріями ІМТ (норма, надлишок, ожиріння) в експериментальній (ЕГ) та контрольній (КГ) групах не мав статистично значущих відмінностей ($\chi^2 = 1{,}18$; $p > 0{,}05$).

Після завершення семестру для ЕГ застосовано Т-критерій Вілкоксона для залежних вибірок. Результати ($p < 0{,}01$) підтвердили невипадковий позитивний зсув показників у бік нормалізації маси тіла. Під час порівняння ЕГ та КГ на контрольному етапі за критерієм $\chi^2$ зафіксовано достовірну перевагу ЕГ ($p < 0{,}05$), де частка здобувачів з нормальним ІМТ зросла суттєво швидше.

Ключовим доказом став кореляційний аналіз за Спірменом [11]. Розрахунок показав сильний прямий кореляційний зв’язок ($r_s = 0{,}74$; $p < 0{,}01$) між кількістю заповнених форм моніторингу (рівнем цифрової взаємодії) та темпами нормалізації ІМТ. Це математично доводить, що регулярне отримання алгоритмізованих email-рекомендацій є дієвим стимулом для корекції фізичного стану.

**Висновки.** Впровадження автоматизованих скриптів у корпоративне ІТ-середовище ЗВО трансформує фізичне виховання у персоналізований процес. Статистичні методи підтвердили, що здобувачі вищої освіти, які системно взаємодіяли з розробленою автоматизованою розсилкою, продемонстрували достовірно кращі результати у нормалізації ІМТ порівняно з КГ. Сильна кореляція між рівнем використання системи та зміною антропометричних показників підтверджує доцільність масштабування таких ІТ-рішень в закладах вищої освіти.

## Список використаних джерел


1. Zhou, Q., Jiang, J., Yin, Z., Fan, R.: Effect of Digital Health Interventions on College Students' Lifestyle Behaviors: Systematic Review. Journal of Medical Internet Research, 28, e82192, (2026). https://doi.org/10.2196/82192.
2. Jiang, S., Ng, J. Y. Y., Choi, S. M., Ha, A. S.: Relationships Among eHealth Literacy, Physical Literacy, and Physical Activity in Chinese University Students: Cross-Sectional Study. Journal of Medical Internet Research, 26, e56386, (2024). https://doi.org/10.2196/56386.
3. Magoc, D., Tomaka, J., Bridges-Arzaga, A.: Using the Web to Increase Physical Activity in College Students. American Journal of Health Behavior, 35(2), pp. 142-154, (2011). https://doi.org/10.5993/AJHB.35.2.2.
4. Potočan, V., Nedelko, Z., Rosi, M.: Digitalization of Higher Education: Students' Perspectives. Education Sciences, 15(7), 847, (2025). https://doi.org/10.3390/educsci15070847.
5. Castro, O., Bennie, J., Vergeer, I., Bosselut, G., Biddle, S. J. H.: How Sedentary Are University Students? A Systematic Review and Meta-Analysis. Prevention Science, 21(3), pp. 332–343, (2020). https://doi.org/10.1007/s11121-020-01093-8.
6. Wang, Y., Min, J., Khuri, J., Xue, H., Xie, B., Kaminsky, L. A., Cheskin, L. J.: Effectiveness of Mobile Health Interventions on Diabetes and Obesity Treatment and Management: Systematic Review of Systematic Reviews. JMIR mHealth and uHealth, 8(4), e15400, (2020). https://doi.org/10.2196/15400.
7. Villinger, K., Wahl, D. R., Boeing, H., Schupp, H. T., Renner, B.: The effectiveness of app-based mobile interventions on nutrition behaviours and nutrition-related health outcomes: A systematic review and meta-analysis. Obesity Reviews, 20(10), pp. 1465-1484, (2019). https://doi.org/10.1111/obr.12903.
8. Feter, N., Dos Santos, T. S., Caputo, E. L., da Silva, M. C.: What is the role of smartphones on physical activity promotion? A systematic review and meta-analysis. International Journal of Public Health, 64(5), pp. 679-690, (2019). https://doi.org/10.1007/s00038-019-01210-7.
9. Bull, F. C., Al-Ansari, S. S., Biddle, S.: World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. British Journal of Sports Medicine, 54(24), pp. 1451-1462, (2020). https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102955.
10. McHugh, M. L.: The Chi-square test of independence. Biochemia Medica, 23(2), pp. 143-149, (2013). https://doi.org/10.11613/BM.2013.018.
11. Schober, P., Boer, C., Schwarte, L. A.: Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. Anesthesia & Analgesia, 126(5), pp. 1763-1768, (2018). https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864.

## CONTENTS / ЗМІСТ

**A. Theoretical and practical aspects for creating information technologies and systems / Теоретичні та практичні аспекти розробки інформаційних технологій і систем……** 6

**Chumachenko D., Liubchenko V.** FROM SCENARIO TO ARCHITECTURE: AN INFORMATION TECHNOLOGY FOR IOT PATTERN PORTFOLIO SYNTHESIS…….. 6

**Ivanov D.** MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE FOR OPTIMIZING THE DISTRIBUTION OF GENERATION AMONG GAS PISTON UNITS WITHIN A SINGLE-SITE ENVIRONMENT…….. 9

**Krasnokutska I., Dutchak O.** COMPARISON OF AUTOMATED TESTING FRAMEWORKS……. 12

**Lytovchenko V., Pidhornyy M., Zasjadko A.** PARAMETRIC AND STRUCTURAL SYNTHESIS OF MECHANICAL INFORMATION SYSTEMS OF VEHICLES……. 15

**Ostrovskyi Z., Barmak O.** SPARSE VISUAL LANDMARKS FOR DRIFT CORRECTION IN GPS-DENIED UAV NAVIGATION……. 17

**Riabchykov M., Nazarchuk L., Tkachuk O., Surova N.** INTEGRATION OF SMART MIRRORS FOR VIRTUAL FITTING WITH OMNICHANNEL SALES SYSTEMS…….. 20

**Vdovychenko V.** INFLUENCE OF CAMERA SENSOR SIZE AND RESOLUTION ON PHOTOGRAMMETRIC 3D RECONSTRUCTION QUALITY: A COMPARATIVE STUDY OF APS-C AND MEDIUM-FORMAT SENSORS……. 22

**Войтех М.Ю., Кравченко О.П.** ПРОГРАМНА СИНХРОНІЗАЦІЯ RTC-МОДУЛІВ DS3231/DS1307 У РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

**Voitekh M.Yu., Kravchenko O.P.** SOFTWARE SYNCHRONIZATION OF DS3231/DS1307 RTC MODULES IN DISTRIBUTED SYSTEMS…….. 26

**Заліський М., Отрох С., Тараненко А., Кондратенко С.** ПРОЄКТУВАННЯ КЛІЄНТ-СЕРВЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ГРУПОВИХ ПОДОРОЖЕЙ

**Zaliskyi M., Otrokh S., Taranenko A., Kondratenko S.** DESIGNING A CLIENT-SERVER SYSTEM FOR GROUP TRIP PLANNING…… 28

**Романюк О.О., Скибчик В.В.** PACS-СИСТЕМИ У ЗАКЛАДАХ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ: ТЕХНІЧНІ ТА СТРАТЕГІЧНІ ВИКЛИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ

**Romaniuk O. O., Skybchyk V.V.** PACS SYSTEMS IN UKRAINIAN HEALTHCARE INSTITUTIONS: TECHNICAL AND STRATEGIC IMPLEMENTATION CHALLENGES.. 31

**Супруненко О., Badri Gechbaia, Онищенко Б., Гребенович Ю.** ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ У КОМБІНОВАНОМУ ПІДХОДІ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

**Suprunenko O., Badri Gechbaia, Onyshchenko B., Grebenovych J.** IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DETERMINING DYNAMIC PROPERTIES IN COMBINED APPROACH TO MODELING SOFTWARE SYSTEMS…….. 34

**Шулаков В.В., Олексюк В.В., Заспа Г.О., Сіньковський А.П.** SCENARIO-DRIVEN RUNTIME SYSTEM ЯК НОВА ПАРАДИГМА ПОБУДОВИ АДАПТИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**Shulakov V., Oleksiuk V., Zaspa H., Sinkovskyi A.** SCENARIO-DRIVEN RUNTIME SYSTEM AS A NEW PARADIGM FOR BUILDING ADAPTIVE INFORMATION SYSTEMS…….. 37

**B. Information technologies in engineering and robotics / Інформаційні технології в інженерії та робототехніці**…… 39

**Batur M., Shafapourtehrany M., Karaman H., Ergun B.** SPATIAL IT-BASED DECISION SUPPORT FRAMEWORK FOR CRITICAL ROAD IDENTIFICATION UNDER NATURAL DISASTERS…… 39

**Chernetsky M., Tcachenko S., Lobunko O.** MULTI-CRITERION OPTIMIZATION TECHNOLOGY FOR SHORT-RANGE AND VISIBILITY AIR VEHICLE MODELS…….. 42

**Dmytruk O., Rastsvietaiev V., Kaliuzhna T., Shypunov S.** OPTIMIZING DRILLING PARAMETERS UNDER UNCERTAINTY: A COMPARATIVE STUDY OF METAHEURISTIC ALGORITHMS (PSO, GA) AND MACHINE LEARNING……. 45

**Dudnik A., Kvashuk D., Fesenko A., Savchenko A., Mykolaichuk V.** ROBUST STABILITY ASSESSMENT OF UAV AIR SEGMENT USING MULTI-SENSOR DATA AND AUTOENCODER-BASED APPROACH……. 47

**Hevlich T., Kuzmenko I., Starenkyi A.** METHODOLOGY FOR AUTOMATED VERIFICATION OF LED INDICATOR SIGNALS…….. 50

**Huliienko S.V., Barbash V.A., Halysh V.V., Trus I.M., Ivanenko O.I.** SPECIALIZED SOFTWARE Q+ AS A TOOL FOR THE OPTIMIZATION OF WATER TREATMENT SYSTEM: A CASE STUDY…… 53

**Kargin A., Petrenko T., Piatykop O., Pronina O.** COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROLLER MODELS USED AT LOW LEVELS OF AI-SUPPORTED AUTONOMOUS ROBOT SYSTEM…….. 56

**Kolodchak O.** DESIGNING OPTIMIZED COMPUTER DEVICE CORES BASED ON LIBRARY ELEMENT SUBSTITUTION TECHNIQUE AND MODIFIED GENETIC ALGORITHM……. 59

**Koroviaka Ye., Dmytruk O., Akolzin I., Zaiets V.** MODELING AND MITIGATION OF TORSIONAL STICK-SLIP OSCILLATIONS IN HORIZONTAL WELL DRILLING ACCOUNTING FOR NON-NEWTONIAN DRILLING FLUID PROPERTIES AND BHA CONFIGURATION……. 62

**Lukashenko V.M., Lukashenko V., Harder D., Sokolovskyi M., Siora O., Bernatskyi A.** DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PROCESSING SYSTEM FOR LASER WELDING AND CLADDING OF COMPONENTS WITH COMPLEX PROFILES…….. 64

**Mikulich O., Komenda D.** PHYSICALLY-ACCURATE DIGITAL TWIN METHODOLOGY FOR ROBOTIC SYSTEMS PREDICTIVE ANALYSIS…… 67

**Nadopta T.A., Mykhaylovska O.A., Seleznova A. V., Kuntsov O.Yu.** AN INTEGRATED APPROACH TO FOOT SOLE DESIGN BASED ON DIGITAL DESIGN AND 3D PROTOTYPING…….. 70

**Pashchenko O.** DIGITAL TWIN OF A ROCK-DESTROYING TOOL: MODELING STRESS DISTRIBUTION AND WEAR RESISTANCE USING FEM AND NEURAL NETWORKS……... 73

**Pundyk S., Horiashchenko S., Karmalita A., Mazur A., Neimak V.** AUTOMATED DATA CONTROL AND PROCESSING SYSTEMS FOR ROBOTIC EQUIPMENT FOR FOOTWEAR MANUFACTURING……... 75

**Romanuke V.V.** OPTIMIZING SAMPLING AND CONNECTION PARAMETERS OF PROBABILISTIC ROADMAP PATH PLANNER IN PATH LENGTH MINIMIZATION FOR ROBOTIC MANIPULATION WITHIN OBSTACLE-DENSE ENVIRONMENTS…… 78

**Vozniak V., Barmak O.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR WEATHER-INVARIANT UAV VISUAL LOCALIZATION VIA A TOPOLOGY-PRESERVING WEATHER AUGMENTATION METHOD…….. 81

**Андрюшко В.Б., Клакович Л.М.** СЕМАНТИЧНІ ОРІЄНТИРИ ДЛЯ GPS-DENIED ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАЛИХ БПЛА НА ОСНОВІ OPEN-VOCABULARY ДЕТЕКЦІЇ
**Andriushko V., Klakovych L.** SEMANTIC LANDMARKS FOR GPS-DENIED POSITIONING OF SMALL UAVs BASED ON OPEN-VOCABULARY DETECTION……. 84

**Благодир О.В., Надопта Т.А.** ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ІТ-СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВИРОБНИЧИХ ЗАВДАНЬ
**Blahodyr O.V., Nadopta T.A.** USE OF INTEGRATED IT SYSTEMS FOR PRODUCTION TASK CONTROL…….. 87

**Васильківський О.В., Васильченко В.Ю., Губар Є.Я., Канашевич Г.В., Хижняк Є.В.** КОНЦЕПТУАЛЬНА СХЕМА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО МАРКУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ
**Vasylkivskyi O., Vasylchenko V., Hubar Y., Kanashevych H., Khyzhniak I.** CONCEPTUAL SCHEME OF THE QUALITY CONTROL SYSTEM FOR ELECTROCHEMICAL MARKING OF METAL PARTS…… 90

**Гальченко В.Я., Сторчак А.В., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.** ГІБРИДНА LUT-СУРОГАТНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ІНВЕРСІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ
**Halchenko V., Storchak A., Trembovetska R., Tychkov V.** HYBRID LUT-SURROGATE INFORMATION TECHNOLOGY FOR REAL-TIME RECONSTRUCTION OF OBJECT INVERSE PARAMETERS BASED ON INDIRECT MEASUREMENTS…… 93

**Мацепа С.М., Канашевич Г.В., Малецький Є.В., Коваленко Ю.І., Коваленко О.О., Губар Є.Я.** ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА СПОСТЕРЕЖЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЗА ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОВЕРХНІ З ВАННИ РОЗПЛАВУ
**Matsepa S., Kanashevych H., Maletskyi Ye., Kovalenko Yu., Kovalenko O., Hubar Ye.** INFORMATION SYSTEM FOR OBSERVATION AND CONTROL OF THE ELECTRON-BEAM PROCESSING OF OPTICAL MATERIAL DURING SURFACE FORMATION FROM A MELT POOL…… 95

**Могілей С.О., Мурр П., Гончаров А.В.** РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПЕРШОРІВНЕВОЇ ІНТЕРМОДАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ НЕКОНТЕЙНЕРНОГО ТИПУ
**Mogilei S., Murr P., Honcharov A.** SOLVING FIRST-LEVEL INTERMODAL TRANSPORT PROBLEM OF NON-CONTAINER TYPE…… 98

**Остроумов І., Кузьменко Н.** ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
**Ostroumov I., Kuzmenko N.** PRESSURE SENSOR DATA INTEGRATION FOR PRECISE NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES…….. 101

**Пташкін Р.Л., Палагін В.В.** ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ БПЛА
**Ptashkin R.L., Palahin V.V.** INFORMATION TECHNOLOGIES FOR RESEARCHING HETEROGENEOUS COMPUTING ENVIRONMENTS OF UAVS…….. 104

**Станкевич О.С., Гальченко В.Я., Трембовецька Р.В., Тичков В.В.** РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕНЕРАТИВНО-ЗМАГАЛЬНИХ МЕРЕЖ

**Stankevych O., Halchenko V., Trembovetska R., Tychkov V.** SOLVING INVERSE PROBLEMS USING GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS……. 107
**Фурсова Т.М., Канюк Г.І., Василець Т.Ю., Мезеря А.Ю., Близниченко О.М.** ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ
**Fursova T.M., Kaniuk G.I., Vasylets T.Yu., Mezeria A.Yu., Blyznychenko O.M.** ENHANCING THE ACCURACY OF AUTOMATED DETERMINATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC PERFORMANCE INDICATORS OF POWER PLANTS CONSIDERING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF CONTROL OBJECTS……. 111

**C. Information technologies and Artificial Intelligent / Інформаційні технології та штучний інтелект**……..…….. 114

**Andriievskyi D.O.** A REVIEW OF ARCHITECTURAL OPTIMIZATION METHODS FOR MULTILINGUAL LARGE LANGUAGE MODELS: THE CHALLENGE OF SEMANTIC COHERENCE RETENTION…….. 114
**Badri Gechbaia, Budiukov Y., Lobach O., Romanenkov Y., Kharuta V.** AI-AUGMENTED CONCEPTUAL MODEL OF COMPROMISE INTEREST BALANCING AMONG INSURANCE MARKET PARTIES…… 116
**Bilous V., Bodnenko D., Horbatovskyi D., Osadchyi V., Osadcha M.** MODELING MEDIEVAL FIGHTS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS……. 118
**Bishyr S., Ivasenko I., Lapychak I.** ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED SOCCER BALL DETECTION: COMPARATIVE ANALYSIS OF ATTENTION MECHANISMS AND THEIR PLACEMENT…… 122
**Bodnenko D., Hlushak O., Lokaziuk O., Osadchyi V., Osadcha V.** INTEGRATION OF MULTIMODAL AI AGENTS INTO STEM TEACHING……. 125
**Bondar V., Babenko V., Lavdanskyi A., Korobeinyk Y., Semenov S.** FLOW-MATCHING AUGMENTATION FOR RARE-CLASS ECG DIAGNOSIS ON PTB-XL…….. 129
**Chengcheng Li, Margarida Romero, Oksana Strutynska.** TEACHING IN THE DIGITAL AGE: HUMAN-AI CO-CREATION OR TEACHERS' REPLACEMENT?..... 132
**Danchuk V., Linskyi O.** FORECASTING CREDIT-RELATED CLIENT INDICATORS USING LSTM NEURAL NETWORKS…….. 135
**Derbentsev V., Bezkorovainyi V., Matviychuk A., Hostryk A., Danylchuk H.** ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR FAKE NEWS DETECTION: BENCHMARKING MULTIMODAL VISION-LANGUAGE MODELS IN SOCIAL MEDIA……. 137
**Fedorov E., Leshchenko M., Babenko V., Myroniuk T., Moath Talat Salah.** NEURAL NETWORK METHODS FOR DATA APPROXIMATION AND ENCODING…… 140
**Hanzha Yu., Rastsvietaiev V., Shypunov S., Yavorska V.** HIGH-SPEED VIDEO ANALYSIS OF ROCK CUTTING AND DRILLING PROCESSES……. 143
**Havdulskyi R., Zhuravchak L.** DEFECT DETECTION AND CLASSIFICATION USING INBEM, YOLO 12, AND ONTOLOGY……. 145
**Klokta D., Znakovska Y., Averyanova Y.** PROBLEMS AND DISADVANTAGES OF USING YOLOV8 IN MODERN REAL-TIME OBJECT DETECTION SYSTEMS……. 148
**Koroviaka Ye., Ratov B., Pashchenko O., Voita M., Rybak A.** ENHANCING PREDICTIVE MAINTENANCE IN DRILLING OPERATIONS: A HYBRID APPROACH COMBINING MACHINE LEARNING AND VIBRATION ANALYSIS……. 151

**Kozurak D.** CLASSIFICATION OF KYIV SIDEWALK CHARACTERISTICS FROM STREET VIEW PHOTOS USING DEEP LEARNING METHODS……. 153
**Lomakin A., Bondarenko T.** ANALYSIS OF CURRENT VIRTUAL REALITY SYSTEMS FOR EXPOSURE THERAPY OF SPECIFIC PHOBIAS IN ADOLESCENT PSYCHOTHERAPY……... 155
**Marchenko I., Kryvenko O., Balalaieva O., Serhiienko A.** A STUDY ON METHODS FOR INTEGRATING MACHINE LEARNING ALGORITHMS INTO REACT-BASED WEB APPLICATIONS FOR PERSONALISED RECOMMENDER SYSTEMS IN E-COMMERCE…….. 158
**Martyniuk M.Yu., Vakaliuk T.A.** REINFORCEMENT LEARNING FOR ADAPTIVE AI OPPONENTS IN UAV SIMULATION…….. 161
**Moroz Y., Dudnik A., Odribets N.** BENCHMARKING A CHESS ENGINE ON LIMITED ENDGAMES……... 164
**Moskalenko V., Kirpichov Yu., Fonta N., Kosenko V.** APPLYING MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ANALYZE E-COMMERCE SALES FOR ENHANCED MARKETING STRATEGY DEVELOPMENT……. 167
**Nazarkevych M., Nazarkevych A., Kuziv O., Nakonechnyi N., Stechkevych O., Yurynets R., Vozna O.** DEVELOPMENT OF A MULTIMODAL DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION SYSTEM FOR EMBEDDED SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE……. 170
**Pavlenko P., Komarov M., Honchar S.** ENSEMBLE MACHINE LEARNING METHODS FOR ANOMALY DETECTION: APPLICATION IN ELECTRONIC INTELLIGENCE AND CYBERSECURITY UNDER ARMED CONFLICT CONDITIONS……. 173
**Serikov M.** HUMAN CAPITAL DEVELOPMENT IN KAZAKHSTAN IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ADOPTION….. 176
**Shcherban A.V.** HIERARCHICAL CORRELATION-CLUSTERING CONTROL FOR ADAPTIVE DRILLING PARAMETER OPTIMIZATION: AN AGENT-DECOMPOSITION FORMALIZATION……. 179
**Shemet D., Umryk M.** RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION: ARCHITECTURE, CLASSIFICATION, AND USE IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR TRAINING FUTURE PRE-SERVICE COMPUTER SCIENCE TEACHERS…….. 182
**Shribak B., Tsymbaliuk T.** HUSSERL: A WEB PLATFORM FOR PERSONAL SCIENTIFIC LIBRARY MANAGEMENT WITH AI-POWERED HYBRID SEMANTIC SEARCH……. 186
**Tyskyi Kh.** QUALITY ASSESSMENT OF VISUAL RECOMMENDATIONS: A THREE-LEVEL FRAMEWORK OF SIMILARITY, RELEVANCE, AND USER EXPERIENCE METRICS…… 189
**Utkina T., Fedorov E., Leshchenko M., Sipko O., Palamarchuk D.** ADAPTIVE METAHEURISTIC METHODS BASED ON THERMAL ENERGY FOR INTELLIGENT SYSTEMS IN INDUSTRY AND BUILDING ENERGY OPTIMIZATION……. 192
**Yurchuk I., Obertan D.-M., Semenchenko T.** SYNTHETIC AERIAL IMAGE GENERATION FOR IMPROVING UAV DETECTION MODELS……. 195
**Zadorozhnyi D.A., Ovcharenko O.A.** ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DESIGN AND MAINTENANCE OF BRIDGES: A REVIEW OF MODERN METHODS AND TOOLS……. 199
**Zhovtonizhko I., Deineha O.** COMPARATIVE ANALYSIS OF HUMAN–AI INTERACTION IN PAIR PROGRAMMING: A STUDY OF CODELLAMA AND GPT-4… 202

**Бурдаєв В.П.** ПРО ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СТЕКУ WEB-ДОДАТКІВ НА ХМАРНІЙ ПЛАТФОРМІ
**Burdaiev V.** ABOUT THE FEATURES OF DEVELOPING A DISTRIBUTED INTELLIGENT SYSTEM FOR CREATING A STACK OF WEB APPLICATIONS ON A CLOUD PLATFORM……. 205
**Голуб С.В., Немов Р.Г.** ФОРМУВАННЯ СЛОВНИКА ОЗНАК ДЛЯ АТРИБУЦІЇ АВТОРСТВА ПРОГРАМНИХ КОДІВ
**Holub S., Nemov R.** FORMATION OF FEATURE DICTIONARY FOR SOURCE CODE AUTHORSHIP ATTRIBUTION…… 207
**Дзюба В.А., Рябоконь І.Ю.** ВЕБОРІЄНТОВАНА СИСТЕМА ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ З УРАХУВАННЯМ ДОРОЖНЬОГО ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ГРАФОВИХ АЛГОРИТМІВ І НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ
**Dziuba V.A., Riabokon I.Y.** WEB-ORIENTED ROUTE PLANNING SYSTEM CONSIDERING ROAD TRAFFIC BASED ON GRAPH ALGORITHMS AND NEURAL NETWORKS…….. 210
**Дігтяренко Н.О., Красношлик Н.О., Сердюк О.А.** РОЗРОБКА ІНТЕРАКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО НАВЧАННЯ
**Dihtiarenko N., Krasnoshlyk N., Serdiuk O.** DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE ENVIRONMENT FOR VISUALIZING THE MACHINE LEARNING PROBLEM-SOLVING PROCESS……. 213
**Карапетян А.Р., Федоров Є.Є., Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Аль-Шайх Я.Д.** СЕГМЕНТАЦІЯ ТРІЩИН БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ТА ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ
**Karapetyan A., Fedorov E., Smoliar A., Miroshkina I., Al-Shaikh Y. J.** DEEP LEARNING AND TRANSFORMER-BASED SEGMENTATION OF STRUCTURAL CRACKS IN BUILDING CONSTRUCTIONS…… 216
**Клоков А.Р., Дяченко П.В.** ГІБРИДИЗАЦІЯ МЕТРИЧНОГО ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
**Klokov A., Dyachenko P.** HYBRIDIZATION OF METRIC AND INTELLECTUAL DATA ANALYSIS FOR SOFTWARE DEFECT DETECTION…….. 219
**Kolisnichenko P., Гнатюк Д., Цікановський В.** МУЛЬТИМОДАЛЬНА CPU-ЕФЕКТИВНА АРХІТЕКТУРА ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ЖУРНАЛАХ ПОДІЙ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ
**Kolisnichenko P., Hnatiuk D., Tsikanovskyi V.** A MULTIMODAL CPU-EFFICIENT ARCHITECTURE FOR ANOMALY DETECTION IN LOGS OF DISTRIBUTED SYSTEMS……... 222
**Кравчук Р.Ю., Ніколюк П.К.** ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИКЛУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ШЛЯХОМ ІНТЕГРАЦІЇ LLM-АГЕНТІВ У СЕРЕДОВИЩА РОЗРОБКИ ТА CI/CD ПРОЦЕСИ
**Kravchuk R.Y., Nikolyuk P.K.** OPTIMIZING THE SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE BY INTEGRATING LLM AGENTS INTO DEVELOPMENT ENVIRONMENTS AND CI/CD PROCESSES…….. 226

**Лось В.Ю., Розломій І.О.** ГІБРИДНИЙ АЛГОРИТМ НЕІНТРУЗИВНОГО МОНІТОРИНГУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ТА ЖАДІБНОГО ЗАПОВНЕННЯ
**Los V.Y., Rozlomii I.O.** HYBRID NON-INTRUSIVE LOAD MONITORING ALGORITHM BASED ON GENETIC ALGORITHM AND GREEDY FILLING…….. 229
**Мацепа С.М., Коваленко Ю.І., Хижняк Є.В., Паламарчук Д.О., Лега А.Ю., Шматков В.Ю.** ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ 3D-МОДЕЛЕЙ ВІДСКАНОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ
**Matsepa S.M., Kovalenko Yu.I., Khyzhniak Ye.V., Palamarchuk D. O., Leha A.Yu., Shmatkov V.Yu.** APPLICATION OF NEURAL NETWORK METHODS FOR ANALYSIS OF 3D MODELS OF SCANNED PARTS…….. 232
**Мельник М.О., Бичков О.С., Петрівський В.Я.** ЕМПІРИЧНА ПЕРЕВІРКА ГІПОТЕЗИ АСИМЕТРІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЦІННОСТІ ВІДПОВІДЕЙ YES/NO В ІНТЕРАКТИВНІЙ ДІАГНОСТИЦІ……. 235
**Moskov V., Беркунський Є.Ю., Павленко А.Ю., Беркунський О.Є.** AI-АСИСТЕНТИ У БЕЗПЕЧНІЙ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ВИКЛИКИ, РИЗИКИ ТА ОСВІТНІ НАСЛІДКИ
**Moskov V., Berkunskyi Ye., Pavlenko A., Berkunskyi O.** AI ASSISTANTS IN SECURE SOFTWARE DEVELOPMENT: CHALLENGES, RISKS AND EDUCATIONAL IMPLICATIONS……. 239
**Никоненко А.О., Фауре Е.В.** ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ШІ-ТЕКСТІВ ДО ТРАНСФОРМАЦІЙНИХ АТАК ШЛЯХОМ БАГАТОРІВНЕВОГО АНАЛІЗУ ОЗНАК
**Nykonenko A., Faure E.** IMPROVING THE ROBUSTNESS OF AI-TEXT IDENTIFICATION SYSTEMS TO TRANSFORMATIONAL ATTACKS THROUGH MULTI-LEVEL FEATURE ANALYSIS……... 242
**Прокопенко Т., Поліщук О., Прокопенко В., Підкуйко О.** МЕТОД ПОПЕРЕДНЬОЇ ПІДГОТОВКИ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ БІОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ
**Prokopenko T., Polishchyk O., Prokopenko V., Pidkuiko O.** METHOD OF PRE-PROCESSING OF MULTIMODAL BIOMETRIC DATA BASED ON FUZZY LOGIC…… 245
**Riashchenko V., Шайволодян Р., Михелєв І., Лобач О.** ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЦІННІСНОЇ ПРОПОЗИЦІЇ ІТ-ПРОДУКТУ
**Riashchenko V., Shayvolodyan R., Mykheliev I., Lobach O.** INTELLECTUAL TECHNOLOGY OF FORMING THE VALUE PROPOSITION OF……. 247
**Сіньковський А.П., Триус Ю.В., Шулаков В.В.** ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ РИЗИКУ БАНКРУТСТВА ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ ТРАНСФОРМЕРНОЇ АРХІТЕКТУРИ
**Sinkovskyi A., Tryus Yu., Shulakov V.** ESTIMATING ENTERPRISE BANKRUPTCY RISK LEVEL WITH A NEURO-FUZZY TRANSFORMER ARCHITECTURE…… 250
**Тесля Ю.М., Хлевна Ю.Л., Катаєва Є.Ю., Клєванна Г.О., Латишева Т.В., Частоколенко І.П.** НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕФЛЕКТОРНИХ ПРОГНОЗУЮЧИХ СИСТЕМ
**Teslia Iu., Khlevna Iu., Kataieva Ye., Klievanna G., Latysheva T., Chastokolenko I.** THE SCIENTIFIC BASIS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF REFLECTIVE FORECASTING SYSTEMS……..……. 253

**Тужиков А., Соловйов В., Ків А.** ЕНЕРГІЇ ФОРМУВАННЯ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ У ПІРЕНІ ЯК МІНІМАЛЬНІЙ МОДЕЛІ ГРАФЕНОВОЇ КВАНТОВОЇ ТОЧКИ
**Tuzhykov A., Soloviev V., Kiv A.** FORMATION ENERGIES OF POINT DEFECTS IN PYRENE AS A MINIMAL MODEL OF A GRAPHENE QUANTUM DOT…… 256

**D. Information and communication and cloud technologies / Інформаційно-комунікаційні та хмарні технології** …….. 259

**Holovnia O., Falkovskyi I.** COMPARATIVE ANALYSIS OF NETWORK TIME SYNCHRONIZATION EFFICIENCY IN A HYBRID MULTI-PLATFORM VIRTUALIZED ENVIRONMENT……. 259
**Orel R., Rozlomii I.** PROTOCOLS AND METHODS FOR OPTIMIZING DATA EXCHANGE BETWEEN EDGE AND CLOUD NODES OF MULTIMODAL SYSTEMS 262
**Дьомін М.К.** МОДЕЛІ СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ OFFLINE-FIRST ЗАСТОСУНКІВ
**Domin M. K.** DATA SYNCHRONIZATION MODELS FOR MOBILE OFFLINE-FIRST APPLICATIONS……. 264
**Комашко В.В., Гавриш О.С., Воробкало Т.В.** АУДИТ МЕРЕЖЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ
**Komashko V.V., Havrysh O.S., Vorobkalo T.V.** AUDIT OF THE NETWORK INFRASTRUCTURE OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION…….. 267
**Крайник Я. М., Доценко Д. В.** РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ СТИСНЕННЯ ПРОМІЖНИХ КАДРІВ ВІДЕО У ВЕБЗАСТОСУНКУ ТА EDGE-ПЛАТФОРМАХ
**Krainyk Y. M., Dotsenko D. V.** DEVELOPMENT AND EVALUATION OF COMBINED METHOD OF INTERMEDIATE FRAMES COMPRESSION IN THE WEB-APPLICATION AND EDGE PLATFORMS…… 270
**Франчук В.М.** ІНТЕГРАЦІЯ ВЕБОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ У ЦИФРОВЕ ОСВІТНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ ЄДИНОГО ОБЛІКОВОГО ЗАПИСУ КОРИСТУВАЧА
**Franchuk V.** INTEGRATION OF WEB-BASED SYSTEMS INTO A DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASED ON A SINGLE USER ACCOUNT…….. 273

**E. Information security / Безпека інформаційних технологій**……... 276

**Bondarenko O., Borysenko I.** LEAKAGE-CONTROLLED IDS-BASED RISK PRIORITIZATION FOR IOT DEVICES…… 276
**Darnapuk Y., Khudolii Y.** A FEDERATED ZERO-TRUST MODEL FOR ARDUINO UNO Q EDGE TELEMETRY IN MULTI-CLOUD IOT ENVIRONMENTS……. 279
**Havrylova A., Tkachov A., Svitlychnyi D.** DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR CLASSIFICATION OF CYBER THREATS TO CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS BASED ON ANOMALIES…… 282
**Mostovyi O.** SYMBOLIC DIGITAL TWIN FOR INTRUSION DETECTION IN SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS…….. 285
**Palahin V., Zrazhevskyi O., Palahina O.** PROACTIVE RANSOMWARE DETECTION METHOD BASED ON ADAPTIVE DECOY STRUCTURES AND KERNEL-MODE FILE OPERATION FILTERING…… 288
**Romanuke V.V.** A LOGIT-AND-GAME-THEORETIC TIMING FRAMEWORK FOR FRAUD DETECTION IN FINANCIAL INFORMATION SYSTEMS…….. 290

**Rozlomii I., Naumenko S.** ANOMALY DETECTION IN IOT DIGITAL TWINS USING TEMPORAL TELEMETRY ANALYSIS WITH BLOCKCHAIN-VERIFIED EVENT LOGGING…….. 293
**Titova V., Klots Yu., Anikin V., Petliak N., Salem A.-B. M.** TWO-FACTOR AUTHENTICATION METHOD BASED ON ONE-TIME PASSWORD GENERATION….. 295
**Yerokhin A., Babii A. A** TEMPORAL KNOWLEDGE GRAPH FOR EXPLOIT PREDICTION FROM NVD AND CISA KEV…… 299
**Yevdokymov S.** INFORMATION SECURITY ASSESSMENT OF RAILWAY INTERLOCKING SYSTEMS USING A DEDICATED CYBER-POLYGON……. 302
**Солдо Б., Беркунський О.Є., Книрік Н.Р., Беркунський Є.Ю.** УРАЗЛИВІСТЬ МАСОВОГО ПРИСВОЄННЯ В REST API НА ОСНОВІ SPRING BOOT: АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ТА МЕТОДІВ ЗАХИСТУ
**Božo Soldo, Berkunskyi O., Knyrik N., Berkunskyi Ye.** BULK ASSIGNMENT VULNERABILITY IN SPRING BOOT-BASED REST API: ANALYSIS OF PROTECTION MECHANISMS AND METHODS…….. 305
**Воробкало Т.В., Івченко О.В., Гавриш О.С., Воробкало О.К.** СИСТЕМАТИЧНИЙ ТА ЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ IOT-ПРИСТРОЇВ НА ПРИКЛАДІ DVR HIKVISION
**Vorobkalo T., Ivchenko O., Havrysh O., Vorobkalo O.** SYSTEMATIC AND ETHICAL SECURITY ANALYSIS OF IOT DEVICES ON THE EXAMPLE OF HIKVISION DVR….. 308
**Ланських Є.В., Ланських О.Б., Наумов О. М.** МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ СТІЙКОСТІ ТА НЕПОМІТНОСТІ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ВИСНОВКУ
**Yevhen Lanskykh, Olena Lanskykh, Oleksii Naumov.** MODEL OF ADAPTIVE MANAGEMENT OF ROBUSTNESS AND IMPERCEPTIBILITY PARAMETERS OF DIGITAL WATERMARKS BASED ON FUZZY INFERENCE…….. 310
**Магро В. І., Прокопович-Ткаченко Д. І., Черкаський Д.О.** КІБЕРЗАГРОЗИ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ОБМІНУ ДАНИМИ РОЗУМНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ У SMART GRID-СЕРЕДОВИЩІ…….. 313
**Палагін В.В., Івченко О.В., Палагіна О.А., Зорін О.С.** ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНОГО MAC-ФЛУДИНГУ У VLAN-ТРАФІКУ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ
**Palahin V., Ivchenko O., Palahina O., Zorin O.** STEALTH MAC-FLOODING DETECTION IN VLAN TRAFFIC USING ML METHODS…… 316
**Побережна З., Набок І., Князєв А.** СТРАТЕГІЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА ВІД ГІБРИДНИХ ЗАГРОЗ
**Poberezhna Z., Nabok I.1, Kniaziev A.** STRATEGIC PRINCIPLES OF ENSURING ENTERPRISE INFORMATION SECURITY AGAINST HYBRID THREATS…….. 319
**Розломій І.О., Науменко С.В.** КОМПАКТНА ПОБУДОВА 5-БІТНОГО S-БЛОКУ З ХАОТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
**Rozlomii I., Naumenko S.** COMPACT 5-BIT S-BOX CONSTRUCTION WITH CHAOTIC PROPERTIES FOR IOT DEVICES…… 322
**Сагун А.В., Панаско О.М.** МЕХАНІЗМИ БЕЗПЕКИ СМАРТ-КОНТРАКТІВ ТА ЦИФРОВИХ ПІДПИСІВ
**Sagun A.V., Panasko O.M.** SECURITY MECHANISMS OF SMART CONTRACTS AND DIGITAL SIGNATURES…… 325
**Сайко Р., Бєлов С., Заліський М.** РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ IOT

**Saiko R., Bielov S., Zaliskyi M.** DISTRIBUTED INTRUSION DETECTION SYSTEM FOR IOT NETWORK…….. 328
**Чепинога А.В., Кожем'якін Д.О., Кожем'якін О.С.** АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА АТАК НА СУЧАСНІ СИСТЕМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ
**Chepynoga A.V., Kozhemiakin D.O., Kozhemiakin O.S.** ANALYSIS OF VULNERABILITIES AND ATTACKS ON MODERN VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS…….. 331

**F. Information technologies for modeling complex processes and systems / Інформаційні технології моделювання складних процесів і систем……** 334

**Aartvork F., Trunova O., Bilous I.** MODELING OF OPERATIONAL MONITORING AND WATER QUALITY FORECASTING SYSTEM BASED ON THE INTERNET OF THINGS FOR AFFECTED TERRITORIES…….. 334
**Bielinskyi A., Soloviev V., Matviychuk A., Solovieva V.** MACHINE LEARNING FORECASTING OF S&P 500 DIRECTION USING ROUGHNESS AND HURST COMPLEXITY FEATURES…….. 337
**Bronin S., Kravchenko O., Sipko O., Karapetyan A., Stepanov M.** ADAPTIVE IOT-BASED DIGITAL TWIN FOR REAL-TIME CASUALTY MONITORING AND TRIAGE… 340
**Brovko K., Budanov P., Oliinyk Yu., Vasiuchenko P., Vynokurova N.** INTEGRATED APPROACHES TO OPTIMIZE THE OPERATION OF INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS OF THE AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX OF THE NUCLEAR POWER PLANT…… 343
**Doskochynskyi D., Ivaskiv R.** USE OF INTER-NODE ASYMMETRY FOR VEHICLE FAULT LOCALIZATION IN EDGE COMPUTING ENVIRONMENTS……. 347
**Gizun A., Morhun A., Borysenko I.** HYBRID MODELING OF MICROSERVICE ARCHITECTURES: A COMPARATIVE ANALYSIS OF ADL AND DSL…… 350
**Herizi A., Ouagueni F., Abed A., Rouabhi R., Zemmit A., Boureguig K.** HIGH-PERFORMANCE SPEED CONTROL OF DFIM USING VECTOR CONTROL AND POSICAST TECHNIQUE…….. 353
**Honcharenko I., Chumachenko S., Yakovliev E., Sokolov Y.** GIS-BASED ENVIRONMENTAL MONITORING FRAMEWORK FOR ACTIVE COMBAT ZONES USING INTEGRATED REMOTE SENSING AND EXPERT MODELING SYSTEMS…….. 356
**Hudz S., Gasii G., Hasii O., Molchanov P.** COMPUTATIONAL ANALYSIS OF SHEAR BUCKLING STRESS IN RECTANGULAR PLATES WITH ELASTICALLY SUPPORTED LONG EDGES……. 359
**Khomenko V., Ratov B., Papaika Yu., Volovyk V., Vashchenko I.** MACHINE LEARNING-BASED PREDICTION AND CORRECTION OF DRILLING FLUID DENSITY MEASUREMENTS…….. 361
**Kononykhin O.** A SELECTION MODEL OF SENSOR NODES FOR INTELLIGENT PARKING SYSTEMS BASED ON FUZZY BWM AND FUZZY MARCOS……. 364
**Liventsev S.P.** ROBUST INFORMATION TECHNOLOGY FOR MODELING AND ADAPTIVE CONTROL OF UAV RADIO LINKS UNDER JAMMING CONDITIONS……. 367
**Lobunko O., Legen L., Asieiev M., Lobunko D.** INFORMATION TECHNOLOGIES IN RESEARCH OF FUNCTIONAL STABILITY OF HYBRID ENERGY SYSTEMS……. 370
**Lutai L., Fedorenko M.** MODELLING THE PROCESS OF SELECTING PARTNERS FOR A VIRTUAL ENTERPRISE TO FULFIL A PORTFOLIO OF ORDERS FOR HIGH-TECH PRODUCTS……. 373

**Mysiura Yu., Yarmilko A.** THE EDITOR FOR PREPARATION AND SUPPORT OF UNMANNED AUTONOMOUS MISSIONS…….. 376
**Naidon I., Revina T.** ON THE APPLYING BAYESIAN GAME THEORY IN STARCRAFT 2… 378
**Nikulin S., Zabolotnyi O., Zabolotnyi V., Siroklyn V., Koshevoy N.** DEDICATED SOFTWARE FOR MODELLING AND VISUALIZING THE FPV DRONE DYNAMICS USING MATLAB GUI AND A QUATERNION INTEGRATOR……. 381
**Oliinyk A., Kyrychenko I.** A MODEL FOR SHORT-TERM FORECASTING OF DEMAND FOR MEDICAL EQUIPMENT DURING A CRISIS SPIKE……. 384
**Pantielieieva N., Laiske Y., Rashevskyi Y., Khutorna M., Goncharenko O., Stupka B.** INTEGRATED EFFECTIVENESS ASSESSMENT MODEL FOR GUIDED AERIAL VEHICLES WITH MICRO TURBOJET ENGINES…….. 388
**Popereshnyak S.** PROBABILISTIC METHODS FOR EARLY ANOMALY DETECTION IN IoT SYSTEMS USING SHORT BINARY SEQUENCES…… 391
**Prykhodko S.** MATHEMATICAL MODELING OF NON-GAUSSIAN RANDOM PROCESSES BASED ON MUTUALLY INVERSE NORMALIZING TRANSFORMATIONS…….. 394
**Revina T., Tymoshchuk D., Duda D.** DETERMINING THE SWITCHING AND LANDING TIME IN THE MOON SOFT LANDING PROBLEM…… 396
**Romanov S., Kupriyanov O., Dichev D., Deryabkina E.** INDUCTION HEATING MODELING OF ROTOR WHEELS IN THE EMWORKS…… 399
**Romanuke V. V.** SMART GRID INTERACTION MODEL ON AXELROD ITERATED PRISONER'S DILEMMA TOURNAMENT FRAMEWORK FOR INERTIAL SELECTION OF SUSTAINABLY EFFICIENT STRATEGIES……. 402
**Shkarupylo V., Artemchuk V.** MODEL-BASED MODIFICATION OF FORMAL-SPECIFICATION ATOMICITY FOR RESOURCE-AWARE MODEL CHECKING……. 405
**Sushchenko O., Yakubovskyi N.** MATHEMATICAL MODELLING AND OPTIMAL SYNTHESIS OF ROBUST CONTROL SYSTEMS FOR MOVING OBJECTS…… 408
**Tkachenko O., Shevchenko A.** A HYBRID MODEL FOR SIGNAL-BASED DEGRADATION ANALYSIS IN EDGE INTELLIGENCE SYSTEMS……... 411
**Vashchenko I., Khomenko V.** APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INTEGRATED MODELING OF HEAVY OIL RECOVERY IN DEEP RESERVOIRS…….. 414
**Vychuzhanin V., Vychuzhanin A., Rudnichenko N., Grishin S., Shibaeva N.** ADAPTIVE ROBUST SHIP MOTION CONTROL SYSTEM'S SIMULATION MODEL CONCEPT…… 417
**Yarmilko A., Marchenko S.** CONCEPTUAL MODEL OF HYBRID CONTROL OF ROBOTIC SYSTEMS WITH DELEGATION OF AUTHORITY……. 420
**Zabolotnii S., Chepynoha A., Klopotovskyi P.** COMPARATIVE EFFICIENCY ANALYSIS OF PMM3 ESTIMATORS FOR LINEAR REGRESSION WITH SYMMETRIC BIMODAL ERRORS…….. 423
**Аль-Амморі Алі, Дяченко П.В.** КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
**Ali Al-Ammouri, Dyachenko P.V.** QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF AUTOMATIC REGULATION SYSTEMS USING INFORMATION TECHNOLOGIES……... 425
**Konrad Krol, Бройде Ю., Ткаченко В., Підгорний М.** МОДЕЛЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ФІЗИЧНИХ ВПРАВ ЗА ВІДЕО ЗОБРАЖЕННЯМ
**Konrad Krol, Broide Y., Tkachenko V., Pidhorny M.** A MODEL FOR RECOGNITION

AND ANALYSIS OF PHYSICAL EXERCISES BASED ON VIDEO IMAGES…….. 429
**Майбородіна Н.В., Герасименко В.П., Мейш Ю.А.** ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ ПІДКРІПЛЕНИХ ОБОЛОНОК
**Maiborodina N.V., Gerasymenko V.P., Meish Yu.** APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MODELING THE STRESS STATE OF MULTILAYER REINFORCED SHELLS…… 432
**Манн Р., Корейба А., Бедрій Д., Семко І., Семко О.** КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЙОВОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ
**Mann R., Koreiba A., Zaiats O., Bedrii D., Semko I., Semko O.** CONCEPTUAL MODEL OF SWARM PROJECT MANAGEMENT……. 435
**Осауленко І.** ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СОЦІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
**Osaulenko I.** INTELLECTUAL TECHNOLOGIES AND MODELING IN THE CONTEXT OF INCREASING THE RESILIENCE OF SOCIOTECHNICAL SYSTEMS……... 438
**Палагін В.В., Зорін О.С.** ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО РОЗРІЗНЕННЯ RZ-СИГНАЛІВ НА ФОНІ НЕГАУСОВИХ ЗАВАД
**Palahin V.V., Zorin O. S.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE RZ-SIGNAL DISTINCTION IN NON-GAUSSIAN NOISE…… 440
**Підгорний М.В., Смоляр Р.А.** ПРОСТОРОВО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОПИТУ НА ТЕПЛОВУ ЕНЕРГІЮ ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ $CO_2$ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС
**Pidgornyi M.V., Smoliar R.A.** SPATIALLY ORIENTED MODEL FOR HEAT DEMAND OPTIMIZATION AND $CO_2$ EMISSION REDUCTION USING GIS…… 443
**Плахотний О.П., Калейніков Г.Є., Йовченко А.В., Костьян Н.Л.** РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ АКУМУЛЯТОРІВ
**Plakhotnyi O., Kaleinikov G., Yovchenko A, Kostian N.** DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL PLATFORM FOR DATA COLLECTION AND PROCESSING IN BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS…… 446
**Смоляр А.М., Мірошкіна І.В., Грецький Д.В., Юрченко С.В., Борковський А.Ш.** АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ З ПОЧАТКОВИМ ВИГИНОМ НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
**Smoliar A., Miroshkina I., Gretskyi D., Yurchenko S., Borkowski A.** ALGORITHMIC SUPPORT AND A COMPUTER MODEL FOR THE ANALYSIS OF FLOOR SLABS WITH INITIAL CURVATURE BASED ON THE GENERALIZED METHOD OF FINITE INTEGRAL TRANSFORMS…….. 449
**Феоклістов Д.О., Богдан Г.А.** ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВИПРОБУВАНЬ МЕМС СЕНСОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
**Feoklistov D., Bohdan H.** OPTIMIZATION OF TEMPERATURE TESTS OF MEMS SENSORS USING COMPUTER MODELING…….. 452
**Ходневич Я.В., Корбутяк В.М.** ВДОСКОНАЛЕННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ШОРСТКОСТІ ШЕЗІ НА ОСНОВІ АНСАМБЛЕВОГО НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ГІДРОМЕХАНІКИ

**Khodnevych Y., Korbutiak V.** ENHANCING NEURAL NETWORK–BASED PREDICTION OF THE CHEZY ROUGHNESS COEFFICIENT VIA ENSEMBLE LEARNING AND AN INVERSE HYDROMECHANICS PROBLEM……. 455

**G. Information technologies in management and economics / Інформаційні технології в управлінні та економіці……** 458

**Antonenko N., Hrinchenko H., Lysenko A., Kotelevets K.** IMPROVING INFORMATION AND ANALYTICAL APPROACHES TO VIBRATION MONITORING FOR EFFECTIVE MANAGEMENT OF EQUIPMENT CONDITION…… 458

**Babenko K., Chernenko V., Kostenko O.** INTEGRATION OF STOCHASTIC INVENTORY MANAGEMENT MODELS INTO CLOUD SPREADSHEETS…… 462

**Bakukha N., Khlevna Iu.** HYBRID DSR-CRISP-GOV APPROACH TO MANAGING A RESEARCH PROJECT ON DEVELOPING A MULTI-CRITERIA ASSESSMENT MODEL FOR PUBLIC PROCUREMENT PARTICIPANTS……... 464

**Bishyr S., Ivasenko I., Lapychak I.** COMPARATIVE ANALYSIS OF ATTENTION MECHANISMS AND THEIR PLACEMENT FOR SOCCER BALL DETECTION……. 467

**Bushuyev S., Timinskyi O., Liashenko D., Yurechko A.** ANALYSIS OF RISKS AND FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF IT PLATFORM DEVELOPMENT PROJECTS…….. 470

**Chobitok V., Hil B.** EFFECTIVENESS OF DIGITAL MARKETING TOOLS IN THE CONTEXT OF MANAGING THE STRATEGIC DEVELOPMENT OF BUSINESS SYSTEMS……... 474

**Chyzhmotria M.O., Chyzhmotria O.V., Vakaliuk T.A.** CLASSIC OPTIMISATION PROBLEMS AS THE BASIS FOR RESOURCE ALLOCATION IN A MANUFACTURING ENTERPRISE……. 477

**Davydov A., Revina T.** TIME-SERIES FORECASTING OF EXCHANGE-TRADED FUND LIQUIDITY……. 480

**Denisova O.** ORCHESTRATING DIGITAL INNOVATION: MULTI-LEVEL PATHWAYS, MECHANISMS, AND CONSTRAINTS…… 483

**Fataliyev T., Mehdiyev Sh. A** SYSTEMS ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL DEPENDENCE AND TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY IN THE OIL AND GAS SECTOR…….. 486

**Kolisnichenko P., Kopytko M., Shevchenko N.** INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE OPERATIONS OF UKRAINIAN ENTERPRISES: CURRENT TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS……. 489

**Konrad Krol, Sevostianova A., Yushchenko Y., Marshak O.** INFORMATION TECHNOLOGIES OF PROJECT PORTFOLIO MANAGEMENT USING VOLATILITY AND TREND IN THE UPPER CONFIDENCE INTERVAL ALGORITHM…… 492

**Kulai D.** INFORMATION TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTING DIFFERENT COMMUNICATION STRATEGIES IN REMOTE WORK ENVIRONMENTS…….. 496

**Mandych O., Makohon V., Staverska T., Maliy O., Bershadska K.** INFORMATION TECHNOLOGY OF ADAPTIVE BUDGETING UNDER LIQUIDITY RISK……. 498

**Mazur I., Alkema V., Zybareva O., Shepeliuk V.** DIGITALIZATION OF INTERNAL AUDIT WITHIN THE ENTERPRISE MANAGEMENT SYSTEM…….. 501

**Ponomarenko I., Hulak D., Yakushev O., Pavlenko V., Ponomarenko D.** MACHINE LEARNING ANALYSIS OF TIKTOK SOCIAL MEDIA MARKETING STRATEGIES: UKRAINIAN ELECTRONICS RETAILERS…… 504

**Romanuke V.V.** A FRAMEWORK FOR MAXIMIZING EXPECTED PERFORMANCE OF CARRIERS BY ENDOGENOUS SMART-CONTRACT-BASED CONSTRUCTION OF THE COALITION CHARACTERISTIC FUNCTION AND THE META-COALITIONAL STABILITY…… 507
**Ruban S., Kurganov I. Tron V.** IMPROVEMENT OF A COMPREHENSIVE MODEL OF IRON ORE PELLET PRICE FORMATION BASED ON A CRM SYSTEM AND MACHINE LEARNING METHODS……. 510
**Rudenko V., Moskvichova O., Pohrishchuk H., Holovai N.** CONSEQUENCES OF THE FUNCTIONING OF THE NEW COMPUTERISED TRANSIT SYSTEM (NCTS) FOR CUSTOMS LOGISTICS……. 514
**Sandeep Kumar Gupta, Charvee Sanjana A., Navya Sree M.S., Saranya T.S., Iryna Mihus, K. Jayadurga Prasad.** THE IMPACT OF AI ON CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABILITY……. 517
**Sandeep Kumar Gupta, Donuru Threesha, Thavva Jyoshna, Saranya T. S, Iryna Mihus, Tamadipati Siddartha.** THE IMPACT OF AI IN CIRCULAR ECONOMY: A SYSTEMIC REVIEW OF HUMAN RESOURCE MANAGEMENT PRACTICES……. 520
**Saranya T.S., Navisha Bajaj, Sambhav Kumar, Preetha D.V., Saheen Nasreen, Shasirekha P., Sandeep Kumar Gupta.** A STUDY ON DREAM HACKING THROUGH THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ELECTROENCEPHALOGRAM……... 524
**Sryberko A.** ALGORITHM FOR IDENTIFYING FUNCTIONAL TYPES OF UKRAINIAN TERRITORIES VIA POWER BI……. 528
**Tarasenko L., Derun I.** THE ROLE OF GENERATIVE AI IN BUSINESS PROCESS REENGINEERING: A LANDSCAPE OF CURRENT RESEARCH…… 531
**Trunova O., Dorosh M., Trunov O., Voitsekhovska M., Haferkorn P.** SOCIAL SYSTEMS PERSPECTIVE ON DECISION-MAKING FOR TRANSPORT ROUTE FORMATION BASED ON FUZZY LOGIC……... 535
**Veres O., Ilchuk P., Kots O., Veres Yu.** USING MACHINE LEARNING METHODS TO PREDICT THE CORPORATE DEBT SUSTAINABILITY…….. 538
**Vorobyov V., Nikolaienko A., Pylypenko A.** COMPETENCY-AWARE TASK ASSIGNMENT IN SOFTWARE TEAMS: A MULTI-CRITERIA DECISION MODEL WITH JIRA INTEGRATION……. 541
**Bieliatynskyi A., Бакуліч О.О., Самойленко Є.С., Голоденко В.О., Песковець Ю.М.** ІНТЕГРОВАНА РИЗИКО-СТІЙКА АДАПТИВНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПОСТАЧАННЯМ ПІДПРИЄМСТВ ТРАНСПОРТНО-ДОРОЖНЬОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
**Bieliatynskyi A., Bakulich O., Samoilenko Y., Holodenko V., Peskovets Y.** INTEGRATED RISK-RESILIENT ADAPTIVE MODEL FOR SUPPLY MANAGEMENT OF TRANSPORT AND ROAD COMPLEX ENTERPRISES BASED ON INTELLIGENT TECHNOLOGIES…….. 544
**Bieliatynskyi A., Данченко О.Б., Ткаченко Ф.В., Бакуліч О.О.** МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ В ІНЖИНІРИНГОВИХ КОМПАНІЯХ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ
**Bieliatynskyi A., Tkachenko F., Danchenko O., Bakulich O.** MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING BUSINESS PROCESS RISKS IN ENGINEERING COMPANIES BASED ON FUZZY LOGIC THEORY…….. 548
**Солдо Б., Гайдаєнко О.В., Серік О.А., Моргулець О.Б.** МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КВАНТИФІКАЦІЇ ФІЗИЧНОГО ОБСЯГУ ІТ-ПРОЄКТІВ БАНКІВСЬКИХ УСТАНОВ

**Božo Soldo, Haidaienko O.V., Serik O.A., Morhulets O.B.** MATHEMATICAL MODEL FOR THE QUANTIFICATION OF THE PHYSICAL SIZE OF IT PROJECTS IN BANKING INSTITUTIONS…….. 551
**Бойко В., Підгорний М. , Литовченко В.** РОЛЬ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УПРАВЛІННІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСАМИ
**Boiko V., Pidhornyy M., Litovchenko V.** THE ROLE OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT…….. 554
**Гайдабрус Б.В., Данченко О.Б., Скакун П.П., Коваленко А.С., Коваленко О.В.** МОДЕЛІ ХМАРНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ЗНАННЯМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ
**Haidabrus B., Danchenko O., Skakun P., Kovalenko A., Kovalenko O.** MODELS OF CLOUD INFORMATION TECHNOLOGY FOR KNOWLEDGE MANAGEMENT IN IT PROJECTS…….. 557
**Гайдабрус Б.В., Кравчук І.В., Заяц О.В., Борисов О.В**. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СТЕЙКХОЛДЕРАМИ В ТРАНСПОРТНИХ ПРОЄКТАХ
**Haidabrus B.V., Kravchuk I.V., Zaiats O.V., Borysov O.V.** INFORMATION-ANALYTICAL MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF STAKEHOLDER MANAGEMENT IN TRANSPORT PROJECTS…… 560
**Головко О., Данченко О.** МЕТОД ПРЕДИКТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ PROCESS MINING ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ
**Holovko O., Danchenko O.** METHOD OF PREDICTIVE OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL BUSINESS PROCESSES BASED ON PROCESS MINING AND MACHINE LEARNING…….. 564
**Gorska M., Федотова Н., Катаєв Д., Бугайчук В.** ЦИФРОВИЙ ПРОТОТИП БАНКУ СЦЕНАРІЇВ УПРАВЛІННЯ КОНФЛІКТАМИ ЯК МОДУЛЯ БАЗИ ЗНАНЬ ПРОЄКТУ
**Gorska M., Fedotova N., Kataiev D., Bugaichuk V.** DIGITAL PROTOTYPE OF A CONFLICT MANAGEMENT SCENARIO BANK AS A PROJECT KNOWLEDGE BASE MODULE…… 567
**Гулич В.В., Міхелєв І.Л.** СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЄКТНО-ПРОЦЕСНОГО УПРАВЛІННЯ БІЗНЕСОМ
**Gulych V.V., Mikhelev I.L.** MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES OF PROJECT AND PROCESS MANAGEMENT OF BUSINESS…….. 570
**Денчик О., Оксамитна Л., Торба Т., Мисник Б.** ЦИКЛІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ КОНФЛІКТАМИ В ІТ-ПРОЄКТАХ В СЕРЕДОВИЩІ AGILE/DEVOPS
**Denchyk O., Oksamytna L., Torba T., Mysnyk B.** CYCLIC CONFLICT MANAGEMENT MODEL IN IT-PROJECTS IN THE AGILE/DEVOPS ENVIRONMENT…… 573
**Денчик О., Меліксетов О.І., Гайдаєнко О.В., Бедрій Д.І.** ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТНИМИ ТА ОПЕРАЦІЙНИМИ РИЗИКАМИ В ТОРГОВЕЛЬНИХ ОРГАНІЗАЦІЯХ
**Denchyk O., Meliksetov O., Haidaienko O., Bedrii D.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE INTEGRATED MANAGEMENT OF PROJECT AND OPERATIONAL RISKS IN RETAIL ORGANISATIONS…… 576
**Журило В.В., Біловодська О.А., Блюмська-Данько К.В.** СПОЖИВЧІ БАР'ЄРИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПРОЦЕСІ ПРИЙНЯТТЯ КУПІВЕЛЬНИХ РІШЕНЬ

**Zhurylo V., Bilovodska O., Bliumska-Danko K.** CONSUMER BARRIERS TO THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE PURCHASE DECISION-MAKING PROCESS…….. 579
**Кавун С.І.** КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧАСОВИМИ ТА ЛЮДСЬКИМИ РЕСУРСАМИ У ПРОЄКТАХ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
**Kavun S.** CONCEPTUAL MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR ADAPTIVE TIME AND HUMAN RESOURCE MANAGEMENT IN SOFTWARE DEVELOPMENT PROJECTS…….. 582
**Kolmykova A., Мазуренко М., Миронець І., Тесленко П., Коваленко А.** СИНТЕЗ АНАЛІТИЧНОГО ЯДРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ «СЛАБКИХ СИГНАЛІВ» ПРОЄКТІВ ЕКСПОРТНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ
**Kolmykova A., Mazurenko M., Myronets I., Teslenko P., Kovalenko A.** SYNTHESIS OF THE ANALYTICAL CORE OF THE INFORMATION SYSTEM FOR DETECTION OF "WEAK SIGNALS" OF EXPORT ACTIVITY PROJECTS……. 585
**Коляда А.Ю.** ПЕРЕВАГИ МЕТОДОЛОГІЇ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В УПРАВЛІННІ ПРОЄКТАМИ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ
**Koliada A.** ADVANTAGES OF SYSTEMS ANALYSIS METHODOLOGY IN PROJECT MANAGEMENT OF POST-WAR RECONSTRUCTION……. 589
**Kondrashov O., Мартиненко М., Бондар О., Баришнікова В., Фонар Л.** ІНФОРМАЦІЙНА СТРУКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ФОРМУВАННЯ BACKLOG IT-ПРОЄКТІВ
**Kondrashov O., Martynenko M., Bondar O., Baryshnikova V., Fonar L.** INFORMATION STRUCTURE FOR THE AUTOMATED MONITORING OF THE BACKLOG FORMATION IN IT PROJECTS…… 592
**Мей Ю., Черненко Ю., Строга А., Борисова Н.** ICuRM: ФРЕЙМВОРК КООРДИНАЦІЇ РИЗИКІВ МІЖ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИМИ СИСТЕМАМИ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
**Maj Yu., Chernenko Y., Stroha A., Borysova N.** ICuRM: A FRAMEWORK FOR RISK COORDINATION BETWEEN INTERDEPENDENT LIFE-SUPPORT SYSTEMS…… 595
**Максимов А.Є., Триус Ю.В.** ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СКЛАДНИХ УМОВАХ З УРАХУВАННЯМ СТАНІВ ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА
**Maksymov A., Tryus Yu.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING IN COMPLEX CONDITIONS CONSIDERING INFORMATION ENVIRONMENT STATES……. 598
**Манн Р., Олійник А., Заяц О., Рибалко І.** ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СКОРИНГОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЦИФРОВИХ РИЗИКІВ У ПРОЄКТАХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ
**Mann R., Oliinyk A., Zaiats O., Rybalko I.** INFORMATION TECHNOLOGY FOR SCORING-BASED ASSESSMENT OF DIGITAL RISK IN ROAD TRANSPORT PROJECTS…….. 601
**Moskov V., Строкань Д., Мисник Л.** АДАПТИВНО-РЕЗИЛЬЄНТНА КОГНІТИВНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ІТ-РИЗИКАМИ ПРОЄКТІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
**Moskov V., Strokan D., Mysnyk L.** ADAPTIVE-RESILIENT COGNITIVE MODEL OF IT RISK MANAGEMENT OF RENEWABLE ENERGY PROJECTS…….. 604

**Мушинський О.Ю., Мічківський С.М., Бевзюк Н.С.** СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ КОМАНД ДЛЯ ПРОЄКТІВ СЦЕНАРНОГО ПЛАНУВАННЯ
**Mushynskyi O., Michkivskyy S., Bevziuk N.** SYSTEM MODEL FOR FORMING EXPERT TEAMS FOR SCENARIO PLANNING PROJECTS…… 608
**Племенник Я.Ю.** ПРОГНОЗУВАННЯ ОБ'ЄМІВ РЕГІОНАЛЬНОГО СПОЖИВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ МОДЕЛЯМИ ЧАСОВИХ РЯДІВ
**Plemennyk Y.** FORECASTING REGIONAL NATURAL GAS CONSUMPTION VOLUMES USING TIME SERIES MODELS…….. 611
**Попов В.В.** МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У МУЛЬТИПРОЄКТНОМУ IT-СЕРЕДОВИЩІ В УМОВАХ BANI
**Popov V.V.** DECISION-MAKING MODELS IN A MULTI-PROJECT IT ENVIRONMENT UNDER BANI CONDITIONS…… 615
**Смерічевський С., Побережна З., Штик Ю.** ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА НА ЗАСАДАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
**Smerichevskyi S., Poberezhna Z., Shtyk Y.** FORMATION OF ENTERPRISE'S ECONOMIC SECURITY SYSTEM BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES…….. 617
**Ткаченко Є.В., Триус Ю.В.** КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЗМІСТОМ IT-ПРОЄКТІВ В УМОВАХ ВІДДАЛЕНОЇ РОБОТИ КОМАНД У СПІЛЬНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ
**Tkachenko Ye., Tryus Yu.** CONCEPTUAL MODEL FOR IT-PROJECT SCOPE MANAGEMENT IN CONDITIONS OF REMOTE WORK IN SHARED INFORMATION ENVIRONMENT…… 621
**Федоренко В.С., Триус Ю.В.** МЕТОДИ КОЛЕКТИВНОГО ІНТЕЛЕКТУ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ З ОБМЕЖЕНИМИ РЕСУРСАМИ В IT-ПРОЄКТАХ
**Fedorenko V., Tryus Yu.** METHODS OF COLLECTIVE INTELLIGENCE AS AN EFFECTIVE TOOL FOR SOLVING SCHEDULING PROBLEMS WITH LIMITED RESOURCES IN IT PROJECTS……. 624
**Чубук Л., Харченко Т.** ДОМІНАНТИ СПОЖИВЧОЇ ПОВЕДІНКИ НА ПЛАТФОРМАХ E-COMMERCE В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ
**Chubuk L., Kharchenko T.** DOMINANTS OF CONSUMER BEHAVIOR ON E-COMMERCE PLATFORMS IN THE CONDITIONS OF WAR IN UKRAINE…….. 628

**H. Information technologies in scientific research / Інформаційні технології в наукових дослідженнях……..** 632

**Barannik E.A., Hrytsenko M.O.** DEEP LEARNING-BASED RECONSTRUCTION OF STIFFNESS MAPS FROM RAY DEVIATIONS IN SHEAR WAVE ELASTOGRAPHY….. 632
**Ivaskiv R., Neroda T.** DYNAMIC LOAD BALANCING OF IMPLEMENTERS IN A COLLABORATIVE PROJECT MANAGEMENT SYSTEM…… 635
**Kozolup Ye., Strutynska O.** AI TOOLS FOR PHD RESEARCHERS……. 638
**Leshko R., Popovych A., Holskyi V., Stolyarchuk I.** DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HYBRID SCIENCE GATEWAY FOR INTEGRATING WEB FRAMEWORKS WITH PARALLEL COMPUTATIONAL CORES…… 640
**Lutay L., Shapovalov Ye., Shapovalov V., Zharinov S.** THE ASPECTS OF DEVELOPMENT MODERN CRIS SYSTEM FOR UKRAINE…… 643

**Neroda T., Ivaskiv R.** TAXONOMIC ANALYSIS OF PROFESSIONAL COMPETENCIES ASSESSMENT IN DISTRIBUTED PROJECT MANAGEMENT ENVIRONMENTS…… 645
**Palchevska O., Aleksandruk I., Luchyk A., Hubych P.** CORPUS AND CONTENT ANALYSIS OF SUGGESTION IN DIGITAL PROPAGANDA ON SOCIAL MEDIA…… 648
**Pavlenko V.** SINGLE-ENVIRONMENT OBSTACLE SEVERITY RANKING WITH ESP32-S3 WI-FI SENSING……. 651
**Petrovych S., Kosovets O., Soia O., Kovtoniuk M.** RESEARCH TRENDS AT THE INTERSECTION OF AI AND SUSTAINABLE EDUCATION…… 654
**Rudakova T. V., Shapovalov Ye. B., Shapovalov V. B., Zharinov S. S., Krasovskyi O. I.** NOVEL FRAMEWORK FOR ACADEMIC EVENT MODULE DESIGN BASED ON EUROPEAN STANDARDS……... 657
**Tovtyn M. M., Mitsa O. V., Petsko V. I.** USING WEB TECHNOLOGIES TO STUDY THE OPTICAL PROPERTIES OF MATERIAL……. 659
**Yelistratova L.A., Apostolov A.A., Pidgrushnyi G.P., Khodorovskyi A.Ya., Zakharchuk Y.V.** USE OF GEOINFORMATION TECHNOLOGIES TO IMPROVE MANAGEMENT IN UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES OF UKRAINE…….. 662
**Zashchepkina N., Petrov V., Hlabets S., Vinnichenko O., Tymchyk R.** INFORMATION TECHNOLOGIES IMPLEMENTATION IN MEASUREMENTS AND SCIENTIFIC RESEARCH……. 665
**Іванова С.М., Кільченко А.В.** ЕМПІРИЧНА ВЕРИФІКАЦІЯ ПРИНЦИПІВ FAIR В ОСВІТНІХ НАУКАХ ЗАСОБАМИ GOOGLE ANALYTICS 4: ДОСВІД НАУКОВОЇ УСТАНОВИ
**Ivanova S., Kilchenko A.** EMPIRICAL VERIFICATION OF THE FAIR PRINCIPLES IN THE EDUCATIONAL SCIENCES USING GOOGLE ANALYTICS 4: THE EXPERIENCE OF A RESEARCH INSTITUTION……. 668
**Кобзар Т.А., Крячок Т.В.** ОЦІНЮВАННЯ СТРЕСОСТІЙКОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАСОБІВ ЦИФРОВОЇ МЕДИЦИНИ
**Kobzar T.A., Kryachok T.V.** ASSESSMENT OF STRESS RESISTANCE USING DIGITAL MEDICINE TOOLS……... 671
**Мейш Ю.А., Лелюх Ю.І., Майбородіна Н. В.** ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНІЧНОЇ ПАНЕЛІ ЕЛІПТИЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
**Meish Yu., Leluykh Yu., Maiborodina N.** NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A CONICAL PANEL WITH ELLIPTICAL CROSS-SECTION USING INFORMATION TECHNOLOGIES…….. 673
**Петрое О., Драч І.** Е-ПОРТАЛ «U-MARC4OS»: ІНТЕГРАЦІЯ ДИНАМІЧНОГО САМООЦІНЮВАННЯ ТА ШІ-АДАПТОВАНОГО МІКРОНАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗВИТКУ ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ В УМОВАХ ВІДКРИТОЇ НАУКИ
**Petroye O., Drach I.** E-PORTAL “U-MARC4OS”: INTEGRATION OF DYNAMIC SELF-ASSESSMENT AND AI-ADAPTED MICRO-LEARNING FOR DEVELOPMENT OF RESEARCH COMPETENCES IN THE CONTEXT OF OPEN SCIENCE…….. 676

**I. Information technologies in higher education / Інформаційні технології у вищій освіті……** 679

**Antoniuk D., Vakaliuk T., Morozov A., Bolotina V.** FROM UNIVERSITY TO FREELANCE: IDENTIFYING IT COMPETENCY GAPS FOR IMPROVING PROFESSIONAL TRAINING PROGRAMS……. 679

**Bazhmina E.A., Shyrokorad D.V., Zapolskykh S.P.** GENERATIVE AI IN HIGHER EDUCATION: A TWO-TRACK HYBRID MODEL FOR SUSTAINING COGNITIVE ENGAGEMENT…….. 681
**Frank Angelo Pacala.** WHEN THINKING IS OUTSOURCED: AI DEPENDENCY IN HIGHER EDUCATION…….. 683
**Hrechukha L., Pavlenko O., Leshchenko H., Sovetna A., Butko N.** AI-DRIVEN ACADEMIC INNOVATION: OPPORTUNITIES, CHALLENGES, AND THE EDUCATIONAL IMPACT OF GOOGLE GEMS……. 687
**Ilchenko I.** STUDENTS' PERCEPTIONS OF GOOGLE SITES AS A SUPPLEMENTARY DIGITAL LEARNING TOOL UNDER CONDITIONS OF UNSTABLE POWER SUPPLY... 689
**Koliasa O., Babelyuk O., Smaglii V.** GENERATIVE AI IN TRANSLATION: HERMENEUTICAL CHALLENGES OF TRANSLATING THE CONCEPT DISASTER….. 691
**Kovalchuk V., Kovalchuk A., Tkachenko N., Horbatiuk R., Mykhailov V.** DIGITALIZATION OF PROFESSIONAL TRAINING OF FUTURE VOCATIONAL EDUCATION TEACHERS IN THE CONDITIONS OF EDUCATIONAL TRANSFORMATIONS…….. 695
**Kovtoniuk M., Bak S., Soia O., Kosovets O.** A SPIRAL MODEL FOR THE CONCEPTUAL GROUNDING OF SET MEASURE THROUGH DIGITAL TOOLS IN DEVELOPING UNDERGRADUATE AND GRADUATE MATHEMATICS STUDENTS' PROFESSIONAL CULTURE……. 698
**Kozubtsova L., Lishchyna V., Kozubtsov I., Beskrovnyi O., Mamonova O.** METHODOLOGY FOR THE FLIPPED USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES TO ENSURE STUDENTS' CONTINUOUS LEARNING UNDER WARTIME CONDITIONS… 701
**Movchan M., Strutynska O., Romero M..** FOSTERING STUDENTS' CREATIVE PROBLEM-SOLVING SKILLS USING MACHINE LEARNING AND DRONES……. 704
**Petrenko L., Artiushyna M., Kulalaieva N., Trynus O., Marshytska V.** USE OF DIGITAL RESOURCES AS A CONDITION FOR IMPROVING THE TEACHING OF PSYCHOLOGICAL AND PEDAGOGICAL DISCIPLINES IN…… 706
**Romanyshyn V., Albota S., Shyika Yu., Dumyn A.** AI-ENHANCED DIGITAL LEARNING FACILITIES FOR POSTGRADUATE CONFERENCE INTERPRETER TRAINING: A CASE STUDY OF LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY……. 709
**Shcherbakov S.S., Shyrokorad D.V.** MODELING TRANSPARENT INTERACTION BETWEEN EDUCATION AND BUSINESS IN A DIGITAL ECONOMY BASED ON BLOCKCHAIN……... 712
**Skorenkyy Yu., Kramar O.** VR SPACE OF A PHYSICAL LABORATORY FOR DISTANCE LEARNING…… 714
**Stetsyk S.** THE EFFECTIVENESS OF THE METHODOLOGICAL SYSTEM FOR THE TECHNICAL TRAINING OF IT SPECIALISTS IN THE CONTEXT OF DEVELOPING PROFESSIONAL COMPETENCIES……. 717
**Tkachenko K.O., Tkachenko O.A., Tkachenko O.I.** MULTIAGENTIC LEARNING SYSTEMS: AN ONTOLOGICAL APPROACH…… 720
**Tuluchenko H., Pershyna Yu., Mezhuyev V.** INTERACTIVE VISUALIZATION OF VECTOR CALCULUS: DEVELOPMENT OF A GAMIFIED EDUCATIONAL APPLICATION……... 723

**Vietrov O., Trofymenko O., Trofymenko V., Hryhorov M.** SOME METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR DESIGNING BASIC TRAINING TASKS DURING THE EARLY STAGES OF STUDYING PROGRAMMING IN HIGHER EDUCATION…….. 726
**Yatsenko R., Pushkar O.** OPEN DIGITAL INCLUSIVE EDUCATIONAL ECOSYSTEM OF UNIVERSITY: CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR ENSURING CONTINUITY OF HIGHER EDUCATION IN UKRAINE…….. 730
**Ганжеєв Д.І., Іванченко Д.А., Клецька О.В., Шикаловський Д.В., Фалендиш А.П.** ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ У ПРАКТИЧНІЙ ПІДГОТОВЦІ СТУДЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ: ДОСВІД, МОЖЛИВОСТІ ТА РИЗИКИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ
**Ganzheev D., Ivanchenko D., Kletska O., Shykalovskyi D., Falendish A.** DIGITAL TOOLS IN PRACTICAL TRAINING OF TRANSPORT ENGINEERING STUDENTS: EXPERIENCE, OPPORTUNITIES AND AI RISKS……. 733
**Дущенко О.С.** ІНТЕРНЕТ-ТЕХНОЛОГІЇ У ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ІНФОРМАТИКИ: СУЧАСНІ ЗАКОРДОННІ ПІДХОДИ Й ТЕНДЕНЦІЇ
**Dushchenko O.S.** INTERNET TECHNOLOGIES IN THE PROFESSIONAL TRAINING OF FUTURE COMPUTER SCIENCE TEACHERS: MODERN INTERNATIONAL APPROACHES AND TRENDS…….. 736
**Заболотній О.А.** ВИКОРИСТАННЯ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ НА ПРИКЛАДІ QGIS
**Zabolotnii O.A.** USE OF APPLICATION SOFTWARE FOR STUDENT EDUCATION ON THE EXAMPLE OF QGIS……. 739
**Злагодух Д.О., Злагодух К.О.** ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ УМІНЬ З КОМП'ЮТЕРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КІБЕРГІГІЄНИ У БАКАЛАВРІВ КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК
**Zlahodukh D., Zlahodukh K.** THE USE OF CLOUD TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING TECHNICAL SKILLS IN COMPUTER ELECTRONICS AND CYBER HYGIENE AMONG BACHELOR STUDENTS OF COMPUTER SCIENCE……. 742
**Кархут В.Я., Галицький О.В.** АДАПТАЦІЯ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДО ВИКЛИКІВ ІНТЕГРАЦІЇ ШІ В ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
**Karkhut V., Halytskyi O.** ADAPTING THE TRAINING OF FUTURE SOFTWARE ENGINEERS TO THE CHALLENGES OF AI INTEGRATION INTO THE SOFTWARE DEVELOPMENT LIFE CYCLE…… 745
**Михнович А., Пилипович О., Андрейчук Ю., Іванов Є., Ковальчук І.** ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ СУЧАСНИМ ВИМІРЮВАЛЬНИМ УСТАТКУВАННЯМ У КОНТЕКСТІ МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ У ГРОМАДСЬКІ ПЛАТФОРМИ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ
**Mykhnovych A., Pylypovych O., Andreychuk Y., Ivanov Y., Kovalchuk I.** PROVISION OF THE EDUCATIONAL PROCESS BY A MODERN MEASURING EQUIPMENT IN THE CONTEXT OF INTEGRATION INTO PUBLIC PLATFORMS OF ENVIRONMENT MONITORING…… 749
**Мунд Й.-П., Хрутьба В., Руденко С., Ковтун Т., Єгорченкова Н., Нікітченко Ю.** DATA-DRIVEN ДІАГНОСТИКА КОМУНІКАЦІЙНИХ РОЗРИВІВ У МІЖНАРОДНИХ ОСВІТНІХ КОНСОРЦІУМАХ

**Mund J.-P., Khrutba V., Rudenko S., Kovtun T., Yehorchenkova N., Nikitchenko Yu.** DATA-DRIVEN DIAGNOSTICS OF COMMUNICATION GAPS IN INTERNATIONAL EDUCATIONAL CONSORTIA……. 751

**Осадча К.П., Осадча М.В.** ЦИФРОВА ТВОРЧІСТЬ В ОСВІТНІХ ЦІЛЯХ В ЕПОХУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ГЕНЕРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ У GEMINI

**Osadcha K.P., Osadcha M.V.** DIGITAL CREATIVITY FOR EDUCATIONAL PURPOSES IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: RESULTS OF THE EXPERIMENT WITH IMAGE GENERATION IN GEMINI……. 754

**Осадча К.П., Павленко В.М., Петрова К.Г., Нестеренко А.М.** ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ОСВІТНІХ ПРОГРАМ НА ОСНОВІ NLP-АНАЛІЗУ РИНКУ ПРАЦІ ТА АРХІТЕКТУРИ СПІВПРАЦІ «ЛЮДИНА-ШІ»

**Osadcha K., Pavlenko V., Petrova K., Nesterenko A.** INTELLIGENT EDUCATIONAL PROGRAM DESIGN BASED ON NLP LABOR MARKET ANALYSIS AND HUMAN-AI COLLABORATION ARCHITECTURE…… 759

**Сердюк О.А., Красношлик Н.О., Дідковський Р.М., Піскун О.В.** ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ОЦІНКИ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ З АВТОМАТИЧНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТЕСТОВИХ ПИТАНЬ НА ОСНОВІ ШАБЛОНІВ

**Serdiuk O., Krasnoshlyk N., Didkowsky R., Piskun** O. INFORMATION SYSTEM FOR STUDENT KNOWLEDGE ASSESSMENT WITH AUTOMATIC GENERATION OF TEST QUESTIONS BASED ON TEMPLATES……... 761

**Фалендиш А., Клецька О., Іванченко Д., Лямзін А., Kravchenko K.** ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-РОЗРАХУНКОВИХ КОМПЛЕКСІВ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ДИСЦИПЛІНИ «РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ» СПЕЦІАЛЬНОСТІ J7 «ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

**Falendysh A., Kletska O., Ivanchenko D., Lyamzin A., Kravchenko K.** IMPLEMENTATION OF INFORMATION AND COMPUTATIONAL COMPLEXES INTO THE EDUCATIONAL PROCESS OF THE DISCIPLINE “RAILWAY ROLLING STOCK” FOR SPECIALTY J7 “RAILWAY TRANSPORT”…….. 764

**Франчук В.М., Юрійчук А.О. В**ИКЛИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ВЕБДОСТУПНОСТІ ЦИФРОВИХ ОСВІТНІХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

**Franchuk V., Yuriichuk A.** CHALLENGES AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR WEB ACCESSIBILITY OF DIGITAL EDUCATIONAL RESOURCES UNDER MARTIAL LAW…… 767

**Франчук Н.П.** ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ З ПРИКЛАДНОЇ ЛІНГВІСТИКИ

**Franchuk N.P.** THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN THE TRAINING OF FUTURE SPECIALISTS IN APPLIED LINGUISTICS……. 770

**Черненко В.П., Карабанов Є.О., Коноваленко Т.В.** СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ЗДОРОВ’Я ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

**Chernenko V. P., Karabanov Ye.O., Konovalenko T.V.** STATISTICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF HEALTH MONITORING DIGITALIZATION FOR HIGHER EDUCATION STUDENTS…… 773

Наукове електронне видання

# ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ
# VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (ІТОНТ-2026)
# 24-25 червня 2026 року

Англійською та українською мовами

Матеріали подано в авторській редакції

Макет: Ю. В. Триус
Коректура: М. В. Денисенко
Технічний редактор: А. Є. Максимов

Гарнітура Arial, Times New Roman. Обл.-вид. арк. 82,2. Зам. №26-062.

Видавець: Черкаський державний технологічний університет,
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції Серія ДК № 896 від 16.04.2002 р.

Scientific electronic publication

# CONFERENCE PROCEEDINGS
# VIII International Scientific and Practical Conference "Information Technology in Education, Science and Technics" (ITEST-2026)
# June 24-25, 2026

In English and Ukrainian

The materials are presented in the author's edition

Layout: Y. Tryus
Proofreading: M. Denysenko
Technical editor: A. Maksymov

Font Arial, Times New Roman. Region-issue sheet 82.2. Deputy #26-062.

Publisher: Cherkasy State Technological University,
460 Shevchenko Boulevard, Cherkasy, 18006.
Certificate of registration of the subject of the publishing business in the State Register of Publishers, of manufacturers and distributors of publishing products Series DK No. 896 dated 04/16/2002