

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Стратегічне
управління, управління
портфелями, програмами та
проектами**

№ 2(11)

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Strategic
management, portfolio,
program and project
management**

No. 2(11)

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2025

Kharkiv
NTU "KhPI", 2025

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків : НТУ «ХПІ», 2025. № 2(11). 87 с. ISSN 2311-4738.

Збірник присвячений розгляду проблем інформаційних технологій управління розвитком компаній, територій і держав. Головна увага приділяється створенню та використанню інформаційних технологій у стратегічному управлінні, управлінні портфелями, програмами, проектами.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів і фахівців в галузі управління розвитком складних систем та інформаційних технологій.

The bulletin is devoted to the problems of information technologies for managing the development of companies, territories, and states. The main focus is on the creation and use of information technology in strategic management, portfolio, program, and project management.

This is for researchers, university professors, postgraduates, students, and professionals in complex systems development management and information technology.

Ідентифікатор медіа R30-01547, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.2023 №1075

Мова статей – українська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», затвердженого Наказом МОН України № 886 від 02.07.2020 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства» зі спеціальностей:

122 Комп'ютерні науки

126 Інформаційні системи та технології

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами», індексується в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах: *WorldCat (США), ResearchBib (Японія), Directory of Research Journals Indexing, Directory of Open Access Journals (США), Universal Impact Factor, Scientific Indexing Services, Google Scholar* і включений у світовий довідник періодичних видань бази даних *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*.

Офіційний сайт видання <http://pm.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Кононенко Ігор Володимирович., д-р. техн. наук, професор, Україна

Chief Editor

Kononenko Igor, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine

Відповідальний секретар

Лобач Олена Володимирівна, канд. техн. наук, доцент, Україна

Executive Secretary

Lobach Olena, PhD, Ass. Professor, Ukraine

Редакційна колегія

Бушуйєв Сергій Дмитрович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Раскін Лев Григорович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Романенков Юрій Олександрович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Саченко Анатолій Олексійович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Сіра Оксана Володимирівна, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Elmas Çetin, доктор наук, професор, Туреччина;
Jaafari Ali, доктор наук, професор, Австралія;
Kolesnikova Kateryna, д-р. техн. наук, професор, Казахстан;
Kryvinska Natalia, д-р. техн. наук, професор, Австрія.

Editorial team

Bushuyev Sergey, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Raskin Lev, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Romanenkov Yuri, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Sachenko Anatoliy, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Sira Oksana, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Chumachenko Igor, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Elmas Çetin, Doctor of Sciences, Professor, Turkey;
Jaafari Ali, Doctor of Sciences, Professor, Australia;
Kolesnikova Kateryna, Dr. Tech. Sc., Professor, Kazakhstan
Kryvinska Natalia, Dr. Tech. Sc., Professor, Austria.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ». Протокол № 13 від 26 грудня 2025 р.

S. BUSHUYEV, N. BUSHUYEVA, D. BUSHUIEV, V. BUSHUIEVA

MATHEMATICAL MODEL OF VALUE CHAIN OPTIMIZATION FOR NUCLEAR SAFETY PROJECTS

Nuclear safety projects are critical for ensuring the secure and sustainable operation of the global nuclear energy sector, yet they are frequently challenged by escalating costs, prolonged schedules, and complex supply chains. Traditional project management methods often fail to capture the interdependencies and high-stakes trade-offs inherent in these projects' multi-stage value chains. This paper addresses this gap by proposing a novel, integrated mathematical model for optimizing the value chain of nuclear safety projects—from design and procurement through construction and commissioning. We develop a mixed-integer linear programming (MILP) formulation that holistically integrates key decision variables, including supplier selection, logistics routing, inventory management, and activity scheduling. The model's primary objective is to minimize total lifecycle cost and project duration while treating safety, quality, and regulatory compliance as inviolable constraints. A case study based on a representative safety upgrade project is presented to validate the model. The results demonstrate the model's capability to generate optimized project plans, identify critical cost and schedule drivers, and perform robust sensitivity analysis on parameters such as resource availability and regulatory review timelines. The proposed framework provides project managers and decision-makers with a powerful, quantitative tool for strategic planning and resource allocation. By enabling a systems-level view of the project value chain, this work contributes to enhancing the economic efficiency and execution predictability of nuclear safety initiatives without compromising their fundamental safety imperative.

Keywords: Value Chain Optimization, Nuclear Safety, Project Management, Mathematical Modeling, Mixed-Integer Linear Programming (MILP), Supply Chain Management, Risk-Informed Decision Making.

С. БУШУЄВ, Н. БУШУЄВА, Д. БУШУЄВ, В. БУШУЄВА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛАНЦЮГА СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ ДЛЯ ПРОЄКТІВ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ

Проекти ядерної безпеки є критично важливими для забезпечення надійної та сталої експлуатації світового сектору ядерної енергетики, проте вони часто стикаються з викликами у вигляді зростання витрат, подовження термінів та складних ланцюгів постачання. Традиційні методи управління проєктами часто не здатні врахувати взаємозалежності та критичні компроміси, властиві багаторічним ланцюгам створення вартості цих проєктів. Дана робота вирішує цю проблему, пропонуючи нову інтегровану математичну модель для оптимізації ланцюга створення вартості проєктів ядерної безпеки – від проєктування та закупівель до будівництва та введення в експлуатацію. Ми розробляємо формулювання задачі змішано-цілочисельного лінійного програмування (MILP), яке цілісно інтегрує ключові змінні прийняття рішень, включаючи вибір постачальників, логістичні маршрути, управління запасами та планування робіт. Основною метою моделі є мінімізація загальної вартості життєвого циклу та тривалості проєкту, при цьому безпека, якість та відповідність нормативним вимогам розглядаються як непорушні обмеження. Для валідації моделі представлено практичне дослідження (case study) на прикладі репрезентативного проєкту з модернізації безпеки. Результати демонструють здатність моделі генерувати оптимізовані плани проєктів, визначати критичні фактори витрат і графіків, а також проводити надійний аналіз чутливості таких параметрів, як наявність ресурсів та терміни регуляторного розгляду. Запропонована структура надає менеджерам проєктів та особам, що приймають рішення, потужний кількісний інструмент для стратегічного планування та розподілу ресурсів. Забезпечуючи системний погляд на ланцюг створення вартості проєкту, ця робота сприяє підвищенню економічної ефективності та передбачуваності виконання ініціатив у сфері ядерної безпеки без шкоди для їхнього фундаментального імперативу безпеки.

Ключові слова: оптимізація ланцюга створення вартості, ядерна безпека, управління проєктами, математичне моделювання, змішано-цілочисельне лінійне програмування (MILP), управління ланцюгами постачання, прийняття рішень з урахуванням ризиків.

1 Introduction. Nuclear energy remains a pivotal component of the global clean energy portfolio, offering a stable, low-carbon alternative to fossil fuels. However, its societal acceptance and sustainable operation are fundamentally contingent upon an uncompromising commitment to safety. Nuclear safety projects—encompassing new design engineering, construction, maintenance, modernization (e.g., upgrades, periodic safety reviews), and decommissioning—are therefore not merely operational activities but critical investments in public trust, environmental protection, and long-term energy security [1, 2]. These projects are characterized by exceptionally high stakes, where technical excellence must be balanced with stringent regulatory compliance, rigorous quality assurance, and dynamic risk management [3, 4]. The execution of nuclear safety projects involves a complex, multi-stage value chain [5, 6]. This chain spans from initial research and design, through procurement of specialized components, complex manufacturing and assembly, rigorous site construction and installation, to

final commissioning and long-term support. Each stage is interdependent, governed by heavy regulation (e.g., IAEA standards, national regulatory bodies), and subject to unique constraints, including limited supplier networks, the need for nuclear-grade quality, and a highly skilled workforce [7, 8]. Consequently, these projects often face significant challenges: escalating capital and operational costs, protracted schedules, and the ever-present risk of cost overruns and delays that can undermine economic viability and, paradoxically, divert resources from core safety functions. Traditional project management approaches, while essential, often address components of the value chain in isolation—optimizing procurement or scheduling tasks separately [9, 10]. This siloed perspective can lead to local efficiencies that create global inefficiencies, such as selecting a lower-cost component that causes delays in later construction phases. There is a critical gap in holistic, quantitative decision-support tools that can model the entire value chain as an integrated system. A mathematical optimization framework is required to navigate the trade-

offs between cost, time, quality, and risk, ensuring that resources are allocated in a manner that maximizes overall safety and economic performance.

This paper proposes the development and application of a mathematical model for value chain optimization (VCO) tailored specifically to nuclear safety projects. We conceptualize the project value chain as a network of interconnected activities, resources, and material flows. The model aims to identify the optimal configuration of decisions—such as supplier selection, technology choice, logistics routing, inventory buffering, and activity scheduling—under the constraints of regulatory requirements, resource availability, and risk thresholds.

To effectively manage nuclear safety projects in turbulent environments, the following mathematical model represents the value chain framework. The model focuses on optimizing project performance while addressing risks, resource allocation, and adaptability.

1. Mathematical Model of Value Chain Optimization for Nuclear Safety Projects.

1.1. Objective Function

The primary goal is to **maximize the overall project value (V)** while minimizing risks, costs, and inefficiencies. The objective function is:

$$\text{Maximize } V = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot A_i) - \sum_{j=1}^m (R_j + C_j)$$

Where:

- V – Total project value.
- A_i – Value generated by activity i (primary or support).
- W_i – Weight of activity i based on its contribution to project success.
- R_j – Risk factor j (quantified as a probabilistic cost).
- C_j – Cost of activity j .
- n – Total number of value-generating activities.
- m – Total number of risks and costs considered.

1.2. Constraints

To ensure feasibility, the model is subject to the following constraints:

1. Budget Constraint:

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq B$$

Where B is the total available budget for the project.

2. Risk Tolerance:

$$\sum_{j=1}^m R_j \leq T$$

Where T is the maximum acceptable risk level.

3. Resource Availability:

$$\sum_{i=1}^n R_{ik} \leq R_k$$

Where R_{ik} represents the resource k required for activity i , and R_k the total available quantity of resource k .

4. Timeline Constraint:

$$\sum_{i=1}^n T_i \leq D$$

Where T_i is the time required for activity i , and D is the project deadline.

5. Regulatory Compliance:

$$C_r(A_i) \geq C_{min}$$

Where $C_r(A_i)$ is the compliance score for activity i , and C_{min} the minimum regulatory compliance threshold.

1.3. Risk Function

Risks (R_j) are modeled as probabilistic costs:

$$R_j = P_j \times E_j$$

Where:

- P_j – Probability of risk j occurring.
- E_j – Expected impact or cost of risk j .

1.4. Adaptability Index

To account for turbulence, an adaptability index (AI) is introduced:

$$A_i = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}$$

Where F_i is the flexibility score of activity i , reflecting its ability to adapt to environmental changes.

1.5. Optimization Technique

The optimization problem can be solved using:

1. Linear Programming (LP): For deterministic scenarios.

2. Stochastic Programming: For scenarios with probabilistic risks.

3. Multi-Objective Optimization: To balance value maximization and risk minimization.

4. AI-Based Techniques: Machine learning models to predict A_i , R_j , and C_j dynamically.

Application Example

Suppose a nuclear safety project has:

- Five primary activities ($A_1, A_2, \dots, A_5$).
- A budget of \$1M ($B=1,000,000B = 1,000,000B=1,000,000$).
- Maximum risk tolerance of 0.3 ($T=0.3$).
- Deadline of 12 months ($D=12$).

By inputting specific values for W_i , A_i , R_j , and C_j , the model calculates the optimal activity allocation, resource distribution, and risk management strategy to maximize project value while meeting constraints.

This mathematical model offers a structured way to analyze and optimize nuclear safety projects, ensuring that resources are used efficiently, risks are minimized, and adaptability to turbulence is achieved.

2. Case Study. Application of the Value Chain Framework in a Nuclear Safety Project

Program Overview.

Program Name: Strategic roadmap of the radioactive waste management, nuclear decommissioning and rehabilitation sector

Location: Ukraine.

Objectives of Strategic roadmap of the radioactive waste management, nuclear decommissioning and rehabilitation sector is presented in the Table 1.

Challenges of Strategic roadmap of the radioactive waste management, nuclear decommissioning and rehabilitation sector is presented on Table 2.

Table 1 – Objectives of Strategic roadmap of the radioactive waste management, nuclear decommissioning and rehabilitation sector

Category	Details
1. Enhance Safety	- Develop and implement measures to ensure the safe handling, storage, and disposal of radioactive waste. - Minimize risks associated with nuclear decommissioning and radioactive contamination.
2. Environmental Rehabilitation	- Restore and rehabilitate contaminated sites to reduce long-term environmental impact.
3. Regulatory Compliance	- Align program activities with international and national nuclear safety and waste management standards.
4. Stakeholder Engagement	- Involve government bodies, international agencies, and local communities to foster transparency and cooperation.
5. Sustainability	- Develop economically and environmentally sustainable strategies for long-term waste management and site rehabilitation.
6. Technology Integration	- Incorporate advanced technologies such as AI, robotics, and digital twins to optimize waste management and decommissioning processes.
7. Capacity Building	- Train local experts and develop human capital for managing complex radioactive waste and decommissioning projects.
8. Risk Management	- Establish robust contingency plans to address unforeseen challenges, including geopolitical and economic instability.

Table 2 – Challenges of Strategic roadmap of the radioactive waste management, nuclear decommissioning and rehabilitation sector

1. Geopolitical Uncertainty	- Ukraine faces ongoing geopolitical tensions that may disrupt program implementation and resource allocation.
2. Aging Infrastructure	- Many facilities and equipment used in radioactive waste management and decommissioning are outdated and require upgrading.
3. Financial Constraints	- Limited funding and economic pressures may hinder large-scale decommissioning and rehabilitation efforts.
4. Technical Complexity	- Managing radioactive waste and decommissioning nuclear facilities require advanced technical expertise and technologies.
5. Regulatory and Bureaucratic Hurdles	- Navigating complex regulatory frameworks and ensuring compliance with stringent safety standards can delay progress.
6. Public Perception and Trust	- Building public trust and addressing concerns related to nuclear safety and environmental risks remain challenging.
7. Environmental Risks	- Natural disasters, extreme weather events, and ongoing environmental degradation pose additional risks.
8. Workforce Limitations	- Lack of sufficient skilled personnel to manage radioactive waste, nuclear decommissioning, and rehabilitation projects.

The program aims to balance safety, environmental sustainability, and efficiency in radioactive waste management, nuclear decommissioning, and site rehabilitation in Ukraine. However, significant challenges, including financial, technical, and geopolitical issues, must be addressed through strategic planning, stakeholder collaboration, and innovative solutions.

3. Program architecture

The first edition of the *Program Strategic Roadmap* was released in February 2022 and approved by the meeting of the Working Group on February 9, 2022. It included 20 programs identified and prioritized by a specially created inter-sectoral Working Group for the development of the *Program Strategic Roadmap*. Delays in the detailed development of the *Program Strategic Roadmap* in 2022 were caused by Russian aggression against Ukraine. The war also negatively affected the State Nuclear Safety Administration and its subordinate enterprises, as previously planned financial resources had to be directed to other priorities. Another negative impact was caused by the

Russian occupation of the Black Sea, during which the nuclear and radiation safety infrastructure suffered damage worth over 100 million euros. Several branches of the State Enterprise Radon Association in Ukraine also suffered infrastructure damage at facilities for which the State Nuclear Safety Administration is responsible. Therefore, the main task of the State Nuclear Safety Administration for the nearest period is to restore the nuclear and radiation safety infrastructure in the Black Sea and other territories of Ukraine.

In response to the new priorities, the State Nuclear Safety Administration has developed an additional program C “Plan for the Restoration of Activities and Development of the Exclusion Zone as a Result of the Russian Invasion and Occupation”. However, it is important to note that, along with these high-priority projects that Ukraine must implement urgently, there are also a number of high-priority projects within the framework of the 20 programs mentioned above. These include the dismantling of unstable structures in the new safe confinement, the

licensing of the ISF-2, which should make it possible to complete the transfer of fuel from ISF-1 to ISF-2, and others.

Although Program C is of great importance, since it will at least restore the radioactive waste management infrastructure to the level that existed before the occupation, there are several other high-priority projects that require funding. Therefore, in the process of selecting urgently needed projects, consideration should be given to including in the plan's other projects that, by their nature, will support nuclear and radiation safety.

4. Implementation of the Value Chain Framework for Program Strategic Roadmap

Primary Activities

1. Program Strategic Roadmap Planning and Design
 - Conducted a comprehensive risk assessment to identify areas of potential safety concerns in reactor systems.
 - Established clear project objectives, including compliance with International Atomic Energy Agency (IAEA) safety standards.
 - Allocated resources across engineering, regulatory compliance, and stakeholder communication.
2. Risk Identification (Table 3) and Mitigation (Table 4).

Table 3 – Key Risks and Challenges

Risk Category	Description	Impact
Geopolitical Instability	- Russian aggression caused delays in roadmap implementation and shifted financial priorities.	- Delayed program execution.
		- Increased operational risks.
		- Reduced resource availability.
Infrastructure Damage	- Damage to nuclear and radiation safety infrastructure in the Black Sea region and other areas.	- Loss of critical facilities.
		- Over 100 million euros in damages requiring urgent restoration.
Resource Diversion	- Planned financial resources redirected to war-related priorities.	- Insufficient funding for high-priority nuclear safety programs.
Operational Delays	- War impacted the ability of the State Nuclear Safety Administration to execute its programs.	- Delays in licensing, fuel transfers, and dismantling of unsafe structures.
Complex Project Prioritization	- Balancing urgent restoration needs with ongoing high-priority projects under the roadmap.	- Risk of neglecting essential projects that ensure long-term nuclear and radiation safety.
Environmental Risks	- Degradation of the exclusion zone due to occupation and conflict-related activities.	- Long-term environmental contamination and increased risks to public safety.
Stakeholder Challenges	- Coordination among inter-sectoral working groups in a crisis environment.	- Delays in decision-making and fragmented implementation of programs.

Table 4 – Risk Mitigation Strategies

Risk Mitigation Area	Proposed Actions	Expected Outcome
Geopolitical Response and Advocacy	- Engage international stakeholders (e.g., IAEA, EU) for support and funding.	- Strengthened global partnerships and additional resources for implementation.
Infrastructure Restoration	- Implement Program C: Plan for the Restoration of Activities and Development of the Exclusion Zone.	- Restoration of critical facilities to pre-war levels or better.
	- Prioritize repair of damaged infrastructure in the Black Sea and other affected regions.	- Enhanced operational capacity for nuclear safety.
Financial Planning	- Create a phased funding plan that allocates resources to the most urgent projects.	- Optimized use of limited financial resources to support urgent and high-priority needs.
	- Seek international financial assistance and partnerships for funding critical projects.	- Increased funding to cover infrastructure repair and ongoing roadmap activities.
Program Prioritization	- Develop a dynamic prioritization framework to evaluate projects based on urgency, impact, and resource availability.	- Balanced implementation of urgent restoration and long-term safety initiatives.
Operational Resilience	- Strengthen the capacity of the State Nuclear Safety Administration and its subordinate enterprises.	- Increased capability to respond to emergencies and adapt to changing conditions.
Environmental Protection	- Focus on rehabilitation of the exclusion zone to mitigate environmental contamination.	- Reduced environmental risks and improved public safety.
Stakeholder Collaboration	- Facilitate transparent communication and collaboration with international agencies, policymakers, and local communities.	- Greater alignment, trust, and cooperation in achieving roadmap objectives.

The successful execution of the Strategic Roadmap for Nuclear Safety in Ukraine requires addressing immediate restoration needs alongside ongoing high-priority projects. By implementing targeted mitigation strategies, prioritizing resources, and fostering international collaboration, the program can restore and enhance nuclear and radiation safety infrastructure under challenging conditions.

Conclusion. This paper has addressed the critical challenge of managing the complex, high-stakes value chains inherent in nuclear safety projects. By developing and demonstrating a tailored mathematical optimization model, we have provided a pathway to reconcile the often-competing objectives of cost efficiency, schedule adherence, and unwavering safety compliance.

Our proposed mixed-integer linear programming (MILP) model moves beyond siloed optimization by integrating the entire project lifecycle—from design and specialized procurement to construction and commissioning—into a single, holistic decision-support framework. The model successfully formalizes the unique constraints of the nuclear sector, including regulatory milestones, nuclear-grade quality requirements, and limited supplier qualifications, treating them not as afterthoughts but as foundational parameters. The case study application validated the model's practical utility, illustrating its ability to generate optimized project plans that identify critical trade-offs, pinpoint cost and schedule sensitivities, and allocate resources in a manner that systemically minimizes total lifecycle expenditure and duration.

The primary contributions of this work are threefold.

Conceptual. We established a structured, optimization-ready value chain framework specifically for nuclear safety projects, defining its key stages, flows, and decision nodes.

Methodological. We developed a rigorous MILP formulation that quantifies the interplay between strategic choices (e.g., supplier selection, technology pathways) and operational performance (cost, time).

Practical. We demonstrated that a model-driven, risk-informed approach can provide project managers with actionable insights for strategic planning, leading to more predictable, efficient, and robust project execution.

Limitations and Future Research.

While this model offers a significant advance, it also presents avenues for further development. First, the current formulation primarily treats risk as a constraint; future

iterations could explicitly integrate probabilistic risk metrics (e.g., failure mode effects) into the objective function for a more nuanced risk-cost-benefit optimization. Second, expanding the model into a multi-objective optimization framework could formally balance a wider set of KPIs, such as supply chain resilience, workforce radiation exposure, and sustainability metrics. Finally, the integration of real-time data streams and machine learning for predictive parameter estimation (e.g., dynamic activity durations, supplier reliability) could evolve this into a dynamic, adaptive tool for project control.

This table organizes the competence areas into their respective domains and specifies the required level of expertise (foundational, operational, or strategic) for each area.

References

1. Bushuyev, S., Chumachenko, I., Galkin, A., Bushuiev, D. and Dotsenko, N. (2025). Sustainable development projects implementing in BANI environment based on AI tools. *Sustainability*, 17(6), p. 2607.
2. Tano, M., & Rubiolo, P. (2022). Development of Explainable Data-Driven Turbulence Models with Application to Liquid Fuel Nuclear Reactors. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en15196861>.
3. Floricel, S., & Miller, R. (2001). Strategizing for anticipated risks and turbulence in large-scale engineering projects. *International Journal of Project Management*, 19, 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(01\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(01)00047-3).
4. Feng, J., Xu, L., & Baglietto, E. (2021). Assessing the Applicability of the Structure-Based Turbulence Resolution Approach to Nuclear Safety-Related Issues. *Fluids*. <https://doi.org/10.3390/FLUIDS6020061>.
5. Xiao, J., & Travis, J. (2013). How critical is turbulence modeling in gas distribution simulations of large-scale complex nuclear reactor containment?. *Annals of Nuclear Energy*, 56, 227-242. <https://doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2013.01.016>.
6. Ramirez, R., & Selsky, J. (2016). Strategic Planning in Turbulent Environments: A Social Ecology Approach to Scenarios. *Long Range Planning*, 49, 90-102. <https://doi.org/10.1016/J.LRP.2014.09.002>.
7. D'Auria, S., & Galassi, M. (2019). The Best Estimate Plus Uncertainty approach in nuclear reactor safety and licensing: Brief history and the elements after licensing. *Nuclear Technology and Radiation Protection*. <https://doi.org/10.2298/NTRP190413022D>.
8. Phaal, R., Farrukh, C., & Probert, D. (2004). Technology roadmapping—A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change*, 71, 5-26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6).
9. Arici, T., & Gok, M. (2023). Examining Environmental Turbulence Intensity: A Strategic Agility and Innovativeness Approach on Firm Performance in Environmental Turbulence Situations. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15065364>.
10. Vecchiato, R. (2015). Strategic planning and organizational flexibility in turbulent environments. *Foresight*, 17, 257-273. <https://doi.org/10.1108/FS-05-2014-0032>.

Received (надійшла) 20.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Бушуйєв Сергій Дмитрович (Bushuyev Sergey) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна; e-mail: sbushuyev@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7815-8129>.

Бушуйєва Наталія Сергіївна (Bushuyeva Nataliia) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна; e-mail: Natbush@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4969-7879>.

Бушуйєв Денис Антонович (Bushuyev Denis) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна; e-mail: BushuyevD@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5340-5165>.

Бушуйєва Вікторія Борисівна (Bushuyeva Victoria) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна; e-mail: bushuieva.v@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7298-4369>.

*Є. О. БУДЮКОВ, О. В. ЛОБАЧ***ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В БІЗНЕС-ПРОЦЕСАХ ПРОДАЖУ АНУЇТЕТІВ НЕЗАЛЕЖНИМИ СТРАХОВИМИ АГЕНТАМИ**

У статті виконано системний аналіз застосування штучного інтелекту (ШІ) в бізнес-процесах продажу ануїтетів незалежними страховими агентами та запропоновано процесну декомпозицію повного циклу взаємодії з клієнтом. Виокремлено послідовні етапи: генерація лідів і пошук потенційних клієнтів; виявлення та оцінка потреб; пошук і підбір продукту; презентація пропозицій і консультація; подання заявки та андеррайтинг; оформлення й доставка поліса; післяпродажна взаємодія та утримання. Для кожного етапу виконано «картографування» відповідних класів моделей і методів ШІ та їх типових функцій у підтримці прийняття рішень і автоматизації. Узагальнення сучасних досліджень показує, що аналітичні моделі (ML-скоринг, класифікація, ансамблеві підходи) підвищують якість відбору лідів, прогнозування поведінки клієнта й оцінювання ризиків; генеративні та NLP/LLM-рішення підтримують роботу з неструктурованими даними (транскрипти дзвінків, листування, документи), забезпечують витяг параметрів, резюмування й підготовку персоналізованих матеріалів для консультації; агентні підходи оркеструють робочі процеси у CRM та документообігу. Наведено кількісні індикатори поширеності застосування моделей за етапами процесу, що відображає нерівномірність технологічної зрілості рішень. Визначено бар'єри впровадження: фрагментованість і неоднорідність даних, алгоритмічна упередженість, обмежена прозорість і пояснюваність, регуляторні вимоги SEC і NAIC, а також складність інтеграції з CRM. Окреслено напрями подальших досліджень: стандартизація підходів, розвиток пояснюваного ШІ та кількісна оцінка балансу між людською експертизою й автоматизацією на різних етапах продажу ануїтетів.

Ключові слова: бізнес-процеси, штучний інтелект; машинне навчання; ануїтети; незалежні страхові агенти; генерація лідів; виявлення потреб клієнта; рекомендаційні системи; автоматизація; пояснюваний ШІ; цифрова трансформація.

*Y. BUDIUKOV, O. LOBACH***THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ANNUITY SALES BUSINESS PROCESSES OF INDEPENDENT INSURANCE AGENTS**

This article presents a systematic analysis of the application of artificial intelligence (AI) in the business processes of annuity sales by independent insurance agents and proposes a process-based decomposition of the full customer interaction lifecycle. The following sequential stages are identified: lead generation; client discovery and needs assessment; product research and carrier selection; proposal presentation and consultation; application submission and underwriting; policy issuance and delivery; and post-sale engagement and retention. For each stage, a "mapping" of relevant classes of AI models and methods and their typical functions in decision support and automation is provided. A synthesis of contemporary research shows that analytical models (ML-based scoring, classification, and ensemble approaches) improve lead qualification, customer behavior forecasting, and risk assessment; generative and NLP/LLM-based solutions support work with unstructured data (call transcripts, chat transcripts, correspondence, and documents), enabling parameter extraction, summarization, and the preparation of personalized advisory materials; and agent-based approaches orchestrate workflows within CRM systems and document management. Quantitative indicators of the prevalence of model usage across process stages are presented, reflecting the uneven technological maturity of available solutions. Key implementation barriers are identified, including data fragmentation and heterogeneity, algorithmic bias, limited transparency and explainability, regulatory requirements imposed by the SEC and NAIC, and the complexity of CRM integration. Directions for future research are outlined, including the standardization of approaches, the advancement of explainable AI, and the quantitative assessment of the balance between human expertise and automation at different stages of annuity sales.

Keywords: business processes; artificial intelligence; machine learning; annuities; independent insurance agents; lead generation; customer needs identification; recommender systems; automation; explainable AI; digital transformation.

Вступ. Сьогодні сучасний ринок страхування ануїтетів зазнає значних змін під впливом сукупності взаємопов'язаних факторів, включаючи технологічну трансформацію, зміну споживчих очікувань, регуляторні зміни та економічні умови. Цифрова трансформація в страховому секторі зумовлена: 1) активним розвитком обсягу ринку впровадження інструментів штучного інтелекту (ШІ), вартість якого у 2025 році перевищила 10 мільярдів доларів [1], де продаж ануїтетів стала однією з найбільш трансформованих галузей; 2) оптимізацією процесів шляхом інтеграції інструментів ШІ у життєвий цикл продажу ануїтетів – від етапу залучення клієнтів до післяпродажного супроводу – забезпечує зростання ефективності та рівня персоналізації [2, 3]. Завдяки конвергенції технологій машинного навчання, аналітики великих даних, хмарних обчислень та інтелектуальної автоматизації, складні завдання, зокрема оцінка ризиків в андеррайтингу, що раніше виконувалися фахівцями, дедалі частіше автоматизуються за допомогою ШІ [2, 4, 5, 6].

Сучасна страхова галузь характеризується високою трудомісткістю операційних процесів, постійною динамікою ринку та зростаючою складністю страхових продуктів, зокрема ануїтетів. Тому важливими факторами, що зумовлюють необхідність впровадження штучного інтелекту, є складність продуктів, яка виникає внаслідок перетину нормативних вимог, індивідуальних налаштувань для клієнтів та волатильності ринку; конкуренція між страховими компаніями, що постійно виводять нові продукти, створюючи виклики для незалежних агентів, які потребують додаткового часу для опанування новинок, а для клієнтів – ускладнюють розуміння пропонованих рішень; збільшення обсягів оброблюваних даних і обмежена здатність існуючих інформаційних систем повною мірою відображати всі аспекти страхових продуктів створюють додаткові бар'єри для ефективного управління. У таких умовах впровадження штучного інтелекту стає ключовим чинником, що сприяє автоматизації рутинних завдань, підвищенню точності прийняття рішень, інтеграції

даних по всіх страхових продуктах та адаптації до швидкозмінного середовища. В результаті ШІ відкриває нові можливості для підвищення конкурентоспроможності агентів і страхової компанії загалом, а також поліпшення якості обслуговування клієнтів через перехід до консультативної ролі, посиленої технологічними можливостями інтелектуальних систем.

Метою статті є аналітичний огляд сучасних інструментів штучного інтелекту (ШІ), що застосовуються страховими агентами, з акцентом на їх інтеграцію в ключові етапи продажів – від залучення клієнтів і персоналізації пропозицій до андеррайтингу та постпродажного супроводу. На основі аналізу доступних платформ, таких як автоматизовані чат-боти для консультацій і моделі машинного навчання для оцінки ризиків, необхідно виявити сильні та слабкі сторони цих технологій, оцінити їх відповідність регуляторним вимогам SEC і NAIC, а також визначити бар'єри впровадження для незалежних агентів.

Впровадження ШІ в бізнес процеси продажі ануїтетів незалежними страховими агентами.

Для систематизації впровадження інструментів ШІ спочатку детально проаналізуємо процес продажу ануїтетів. Бізнес-процес продажу продукту ануїтету можна розкласти на наступні ключові етапи (рис. 1): генерація лідів та пошук нових клієнтів, виявлення та оцінка потреб клієнтів, пошук і підбір продукту страхової компанії, презентація пропозицій та консультація клієнта, подання заявки та оцінка ризиків клієнта, оформлення та доставка ануїтетного полісу, післяпродажна взаємодія та утримання клієнтів. Кожен етап традиційно включає ручну обробку даних, комунікацію та рішення, що призводить до неефективності роботи та навіть втрати клієнта; ШІ-інструменти оптимізують їх, досягаючи автоматизації до 70% рутинних завдань [7].

Подальша деконструкція цих процесів дозволить виявити критичні точки, де інноваційні технології та інструменти ШІ здатні підвищити ефективність роботи агента та створити додаткову цінність для клієнта.

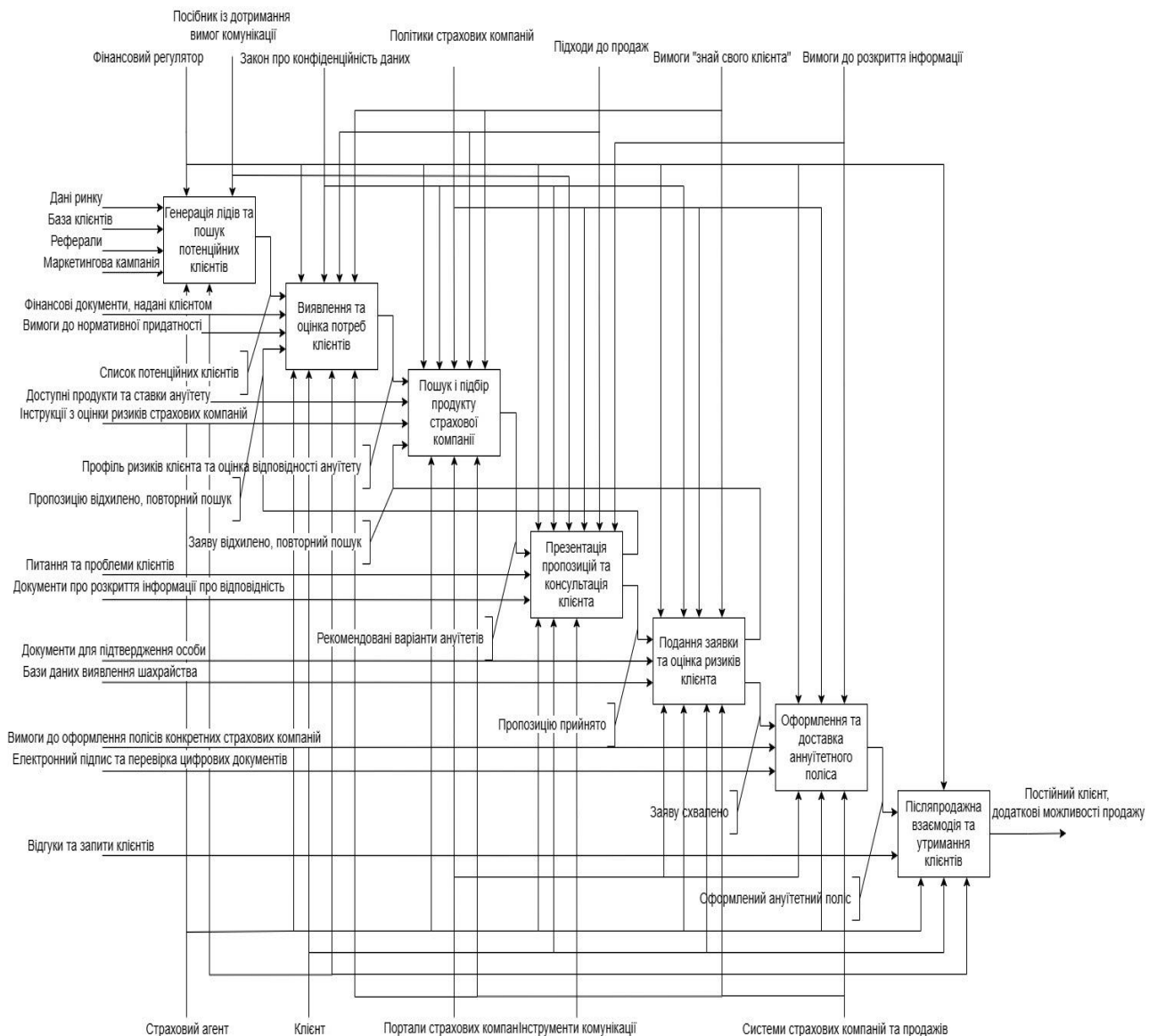


Рис. 1. Бізнес-процеси процесу продажу продукту ануїтету

Генерація лідів та пошук нових клієнтів.

Генерація лідів та пошук нових потенційних клієнтів є початковим етапом в роботі незалежного страхового агента у процесі продажу ануїтетів. Цей етап є критично важливим з кількох ключових причин, які впливають на продажі, доходи, ефективність та конкурентоспроможність [8, 9]. Незалежні страхові агенти функціонують поза прямим впливом маркетингових організацій, брокерських структур та страхових компаній, що зумовлює особливості їхньої професійної діяльності. На відміну від агентів, які працюють у межах корпоративних систем із розвиненою мережею залучення клієнтів, незалежні фахівці змушені самостійно формувати власну клієнтську базу та розробляти стратегії продажу. Такий формат роботи підвищує значення індивідуальних підходів до просування страхових продуктів, розвитку комунікаційних навичок і застосування сучасних методів маркетингу та продажів.

У цьому контексті особливої актуальності набуває використання сучасних цифрових технологій, включно зі штучним інтелектом, які відкривають нові можливості для аналітики клієнтських потреб, оптимізації процесів взаємодії та підвищення ефективності роботи агентів.

У дослідженнях [8, 9, 10] зазначається, що методи машинного навчання, такі як логістична регресія, дерева рішень, випадковий ліс, градієнтний бустинг та нейронні мережі, є найбільш ефективними для прогнозування ймовірності конверсії лідів на основі історичних даних, що дозволяє зосередити зусилля на найбільш перспективних потенційних клієнтах. Дослідження [9] та [11] показують, що конверсія лідів зростає, у середньому, на 26%, річний дохід – на 50%, а витрати на лід зменшуються на 25%. У дослідженні [12], кластерні методи застосовуються для групування населення за профілями ризику, що полегшує генерацію лідів. Аналогічно, у роботі [3], ШІ інтегрується з IoT для збору даних з носимих

пристроїв, оптимізуючи лідогенерацію на 15–25%. Дослідження [13] показує, що чат-боти та системи автоматизації (наприклад, на базі NLP) взаємодіють із клієнтами через email чи соцмережі, генеруючи ліди з ROI до 70%.

У свою чергу, використання моделей та методів ШІ має низку недоліків, недопрацювань та прогалин. Зокрема, автори [9] виділяють такі проблеми, як неповнота та низька якість наборів даних, що унеможливорює формування надійних прогнозів у lead scoring. Особливої уваги потребує питання алгоритмічної упередженості: моделі, навчені на історичних даних, часто відтворюють приховані соціальні чи демографічні патерни, що створює як етичні, так і регуляторні ризики [14]. Водночас складні моделі – зокрема алгоритми бустингу чи нейронні мережі – функціонують як “чорні скриньки”, що ускладнює їх пояснюваність і стримує довіру з боку страхових агентів. Це призводить до опору впровадження навіть у тих випадках, коли приріст точності є статистично значущим. Крім того, сучасні рішення демонструють обмежену здатність адаптуватися до динаміки ринку [15]: вони потребують частого перенавчання, яке вимагає додаткових ресурсів і підвищує витрати. Нарешті, інтеграція таких моделей у CRM-системи супроводжується проблемами сумісності та приватності даних, що є критичним бар’єром для малих агентів, які працюють у сфері продажу ануїтетів. У сукупності ці обмеження формують дослідницькі прогалини, що зумовлюють потребу у розробці більш прозорих, адаптивних та ресурсоефективних рішень.

На основі аналізу джерел [3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] створено список методів і моделей штучного інтелекту з розрахунком процентів їх застосування у дослідженнях.

Загальна кількість згадок моделей і методів: 96. Кількість унікальних методів: 36. Список найпопулярніших моделей і методів ШІ за частотою застосування зображено на рисунку 2.

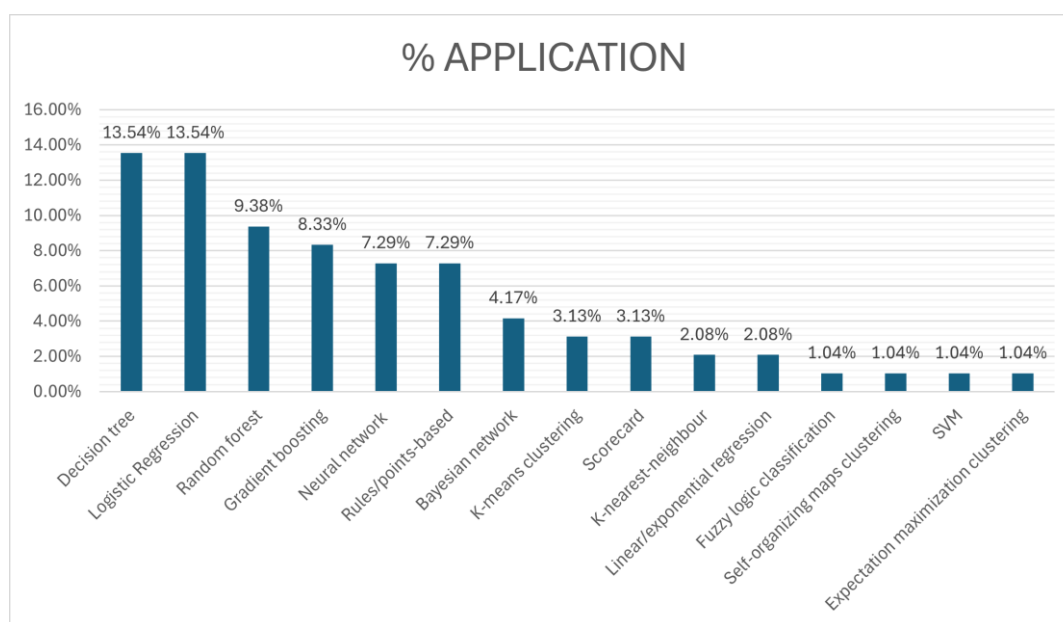


Рис. 2. Найпопулярніші моделі і методи ШІ у процесі генерація лідів та пошук нових клієнтів

Виявлення та оцінка потреб клієнтів. На цьому етапі робота страхового агента полягає у встановленні контакту з клієнтом, налагодженні діалогу та застосуванні різних методик для виявлення його ключових фінансових, особистісних або медичних цілей. Страховий агент повинен не лише зібрати первинну інформацію, а й інтерпретувати її у ширшому контексті потреб клієнта, що є критично важливим для формування персоналізованих страхових рішень. Саме на цьому рівні закладається основа для подальшої взаємодії, адже розуміння індивідуальних цілей і фінансових пріоритетів забезпечує відповідність запропонованих рішень реальним очікуванням і можливостям клієнта [16, 17]. Для агента цей процес не обмежується збором стандартизованих даних, а передбачає глибший аналіз – від оцінки фінансових намірів до визначення рівня готовності приймати ризики [18].

Оцінка потреб виконує кілька взаємопов'язаних функцій. По-перше, вона сприяє трансформації фрагментованої інформації у цілісну модель клієнта, що дозволяє створювати більш персоналізовані рішення. По-друге, правильно проведений аналіз знижує ризики помилкових рішень, допомагає відокремлювати істинні потреби від другорядних побажань та мінімізує вплив неякісних або неповних даних [16]. По-третє, він стає основою для побудови довіри й довгострокових відносин, що є визначальним чинником стабільності бізнес-моделі агента [19, 20]. Таким чином, процес виявлення та оцінки потреб клієнтів можна розглядати не лише як практичний інструмент у сфері страхових послуг, але й як критичний елемент моделі прийняття рішень, де якість даних, методи їх інтерпретації та точність прогнозів безпосередньо впливають на ефективність як взаємодії з клієнтом, так і всієї діяльності незалежного страхового агента.

У дослідженнях [21] та [22] наголошується, що застосування Natural Language Processing (NLP) значно полегшує аналіз текстових і голосових даних клієнтів – від розшифровок дзвінків до чатів у CRM – з метою виявлення фінансових цілей, рівня толерантності до ризику та часових горизонтів інвестування. Для цього застосовуються сучасні трансформерні моделі, зокрема BERT та GPT, які демонструють високі результати у завданнях визначення наміру та вилучення ключових параметрів, досягаючи до 80% точності в автоматизованій оцінці потреб [23]. Паралельно кластеризаційні методи дозволяють групувати клієнтів за схожими профілями ризику чи поведінковими характеристиками. Це особливо важливо для страхових агентів, які мають справу з великими та різноманітними базами потенційних покупців ануїтетів. Окрім цього, активно впроваджуються conversational AI-системи (чат-боти та голосові асистенти), які проводять структуровані опитування клієнтів, скорочуючи середній час етапу виявлення потреб на 30–35% [24].

Дослідження також вказують і на низку недоліків. Перш за все значне поширення мають невпорядковані дані – короткі дзвінки, фрагментовані транскрипти, розмовна мова з акцентами та стороннім шумом, які

потребують складної передобробки через ASR-системи. Наприклад, у дослідженнях показано, що для досягнення пристойної точності ASR у специфічних доменах необхідне доналаштування на великих обсягах доменних даних з явним шумом та варіантами акцентів [25]. По-друге, нестача галузевих датасетів, особливо таких, що відображають особливості ануїтетів: фінансові терміни, мовні конструкції клієнтів, життєві ситуації, які впливають на потреби. Без таких даних моделі часто навчаються на загальних даних, що зменшує якість оцінки потреб у специфічному контексті [25]. Третя прогалина – ризики неправильного тлумачення намірів клієнта, що може призвести до юридичних чи етичних наслідків: неповне розуміння, некоректні рекомендації, або навіть порушення стандартів конфіденційності. Одним із шляхів цієї проблеми є відсутність чітких протоколів згоди користувача на запис і використання розмов, або недостатня обробка приватної інформації в самих ASR/NLP системах. Сучасні огляди з питань приватності у розпізнаванні мови підкреслюють, що мова сама по собі містить велику кількість додаткової інформації, яка може бути чутливою, і що без належного захисту і регуляторного контролю існують ризики витоку чи незаконного використання таких даних [26, 27, 28]. Четверта прогалина – адаптивність моделей до різних доменів та змінної поведінки клієнтів. Багато моделей добре працюють в одному контрольованому домені, але коли контекст змінюється (інші умови, нові терміни, інша платформа), їх продуктивність різко падає. Недостатньо досліджень, які б досліджували “domain adaptation” або “transfer learning” у специфічному контексті ануїтетів, або методів, які б підтримували моделі у реальному часі/змінному середовищі.

На підставі опрацювання літературних джерел [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28] сформовано перелік методів і моделей штучного інтелекту з визначенням частки їх використання у наукових дослідженнях. Загальна кількість зафіксованих згадок становить 568, з яких 39 є унікальними методами. Найбільш поширені моделі та методи III за частотою застосування подано на рисунку 3.

Пошук і підбір продукту страхової компанії. На етапі пошуку і підбору продукту страховий агент використовує всі доступні інструменти для аналізу та визначення найбільш відповідного ануїтетного продукту, орієнтуючись на потреби клієнта, ідентифіковані під час попереднього етапу “Виявлення та оцінка потреб клієнтів”. Сучасний фінансовий ринок характеризується різноманіттям і зростаючою складністю страхових та інвестиційних продуктів, що ускладнює для клієнта самостійне прийняття рішень. Більшість користувачів не володіють достатньою експертизою для адекватної оцінки ризиків і прогнозування результатів, саме тому страховий агент виконує роль посередника та експерта у цьому процесі [29, 30, 31].

Застосування методів рекомендаційних систем та інструментів штучного інтелекту у цьому процесі

відкриває нові можливості для оптимізації пошуку та порівняння продуктів [32]. Такі технології здатні зменшити інформаційне перевантаження, підвищити якість прийняття рішень, а також сприяти розвитку фінансової грамотності клієнтів [33, 34, 35, 36]. Таким

чином, пошук і підбір ануїтетного продукту – це багатофакторний процес, у якому поєднуються експертиза страхового агента, персоналізовані рекомендації та сучасні технології аналізу даних, що разом задовольняють інтереси клієнта.

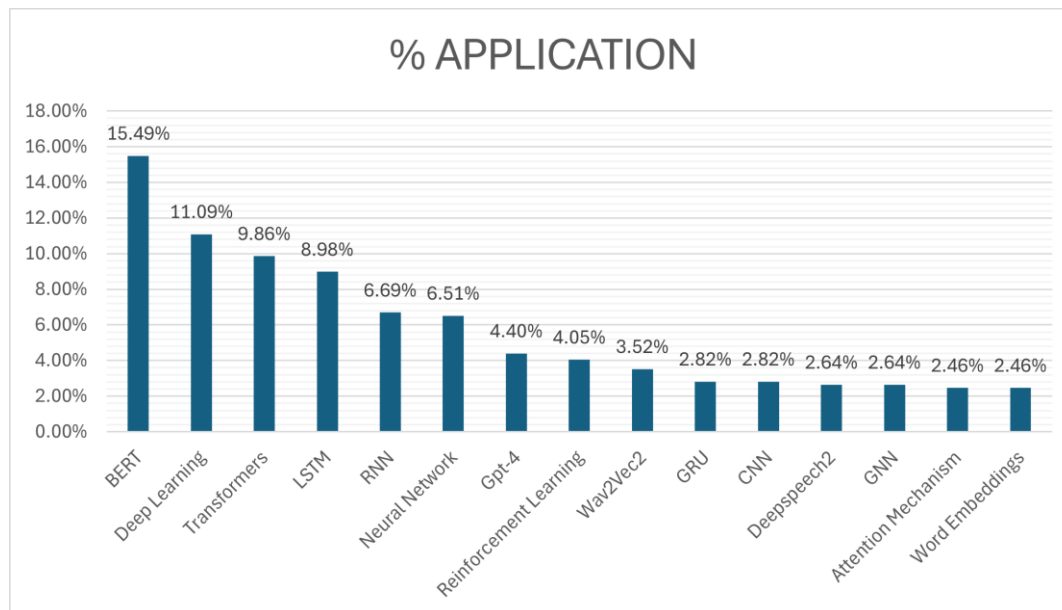


Рис. 3. Найпопулярніші моделі і методи ШІ у процесі виявлення потреб

Автори дослідження [37] вказують, що застосування сучасних моделей і методів AI, зокрема гібридних рекомендаційних систем, ансамблевих моделей оцінки ризику та нейронних мереж, відкриває значні переваги. Зокрема, ResPoNet демонструє зменшення середньої похибки оцінки портфеля на 25% у порівнянні з традиційними моделями при обробці до 100000 контрактів, забезпечуючи водночас швидкість і масштабованість у процесах аналізу великих даних. Подібні результати підтверджують. Подібні результати підтверджують дослідження [38], які продемонстрували, що нейронні мережі з широкими шарами перевищують дерева рішень за точністю оцінки вартості ануїтетних портфелів на понад 10% у середніх сценаріях. Особливої уваги заслуговують рекомендаційні системи у страхуванні: у тестових сценаріях гібридні підходи (content-based + collaborative) досягають значень NDCG@10 у межах 0.30–0.60, що відповідає рівню комерційно значущої ефективності при маркетингу складних фінансових продуктів [39]. У підсумку, ці результати демонструють, що поєднання рекомендаційних систем із моделями оцінки ризику створює основу для адаптивної підтримки прийняття рішень у сфері страхування та ануїтетів.

Водночас наявні дослідження фіксують низку обмежень, що ускладнюють практичне застосування таких моделей. По-перше, для ануїтетів характерна висока розрідженість даних: у більшості клієнтів відсутня тривала історія купівель, що зумовлює ефект “холодного старту” та знижує ефективність рекомендаційних систем, особливо у колаборативних сценаріях. По-друге, метрики ефективності, зокрема NDCG чи Precision@K, хоч і відображають якість

рекомендацій у статистичному вимірі, не гарантують фінансової оптимальності чи відповідності регуляторним вимогам – висока NDCG@10 не означає, що запропонований продукт є юридично коректним або фідучіарно оптимальним для клієнта [39]. По-третє, наявні моделі рідко інтегрують макроекономічні показники та рейтингову інформацію страхових компаній у режимі реального часу, що робить їх менш чутливими до коливань ринку. Нарешті, регуляторні бар’єри, пов’язані з прозорістю алгоритмів та захистом прав споживачів, вимагають інтеграції пояснюваного ШІ у рекомендаційні системи для страхування [40].

У результаті аналізу наукових публікацій [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40] було укладено перелік методів і моделей штучного інтелекту з оцінкою відсоткового рівня їх використання. Загальна кількість згадувань методів і моделей дорівнює 202, при цьому кількість унікальних підходів складає 46. Розподіл найпопулярніших моделей і методів ШІ представлено на рисунку 4.

Презентація пропозицій та консультація клієнта. Після завершення етапу підбору ануїтетних продуктів, страховий агент переходить до безпосередньої взаємодії з клієнтом, яка передбачає презентацію сформованих пропозицій. На цьому етапі акцент робиться на детальному поясненні характеристик і ключових параметрів кожного продукту, а також на аргументації причин їхньої доцільності для конкретної ситуації клієнта. Процес презентації зазвичай супроводжується активною консультаційною взаємодією: клієнт ставить уточнювальні запитання, висловлює занепокоєння та отримує необхідні роз’яснення для формування обґрунтованого рішення.

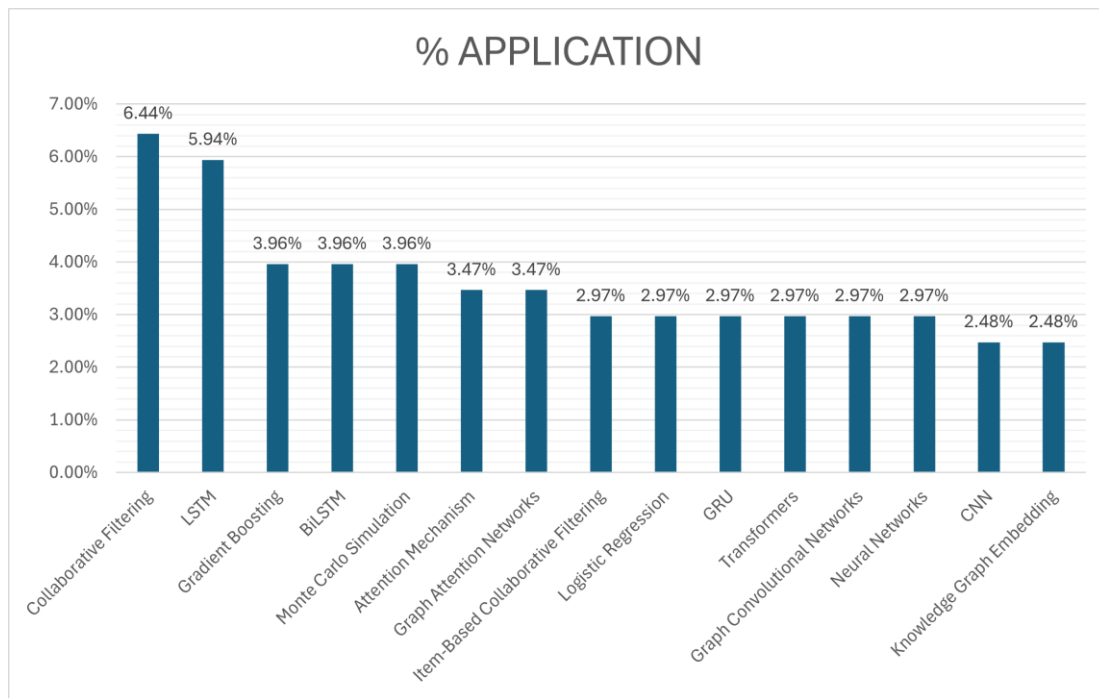


Рис. 4. Найпопулярніші моделі і методи ШІ у процесі пошуку і підбору продукту

Цей процес можна інтерпретувати через поєднання кількох підходів: моделі процесуальної консультації, що акцентує увагу на комунікативній динаміці та спільній діагностиці, та моделі спільного прийняття рішень, яка підкреслює важливість залученості клієнта до вибору оптимального рішення [41, 42]. Додатково, сучасні інструменти штучного інтелекту відкривають можливості автоматизації створення презентаційних матеріалів, полегшуючи підготовку візуального контенту та підвищуючи продуктивність агента [43].

Разом з тим, клієнт може відмовитися від запропонованого ануїтету з низки суб'єктивних причин, серед яких – невідповідність окремих характеристик продукту очікуванням, надмірні обмеження, або інші особисті чинники. У випадку такої відмови агент повертається до попереднього етапу “Пошук і підбір продукту страхової компанії”, ініціюючи повторний цикл добору альтернативних варіантів. Таким чином, процес “презентація та консультація” є не лише етапом інформування, а й інтерактивним процесом комунікації, в якому поєднуються професійні знання агента, очікування клієнта та цифрові технології підтримки рішень. Саме від ефективності цієї взаємодії залежить якість кінцевого вибору, рівень задоволеності клієнта та довгострокова успішність страхових відносин.

Згідно зі статтею [44], при використанні тонко налаштованих вбудованих моделей разом із великими мовними моделями та reasoning-ітераціями RAG-система досягає значного зростання точності відповідей, іноді перевищуючи загальні моделі на кілька відсоткових пунктів, зокрема, для фінансових запитів точність підвищується на 5-10% від базових моделей без доменної адаптації. Крім того, дослідження [45] повідомляє, що інтеграція LLM для

автоматизації знань, наприклад, формулювання частин консультацій або контент-генерації, призводить до помітної економії часу на операційні завдання, збільшуючи пропускну здатність консультаційного процесу без зниження якості обслуговування.

Незважаючи на зазначені переваги, існують вагомні обмеження, які слід враховувати при застосуванні ШІ у презентації пропозицій та консультаціях клієнта. Перш за все, багато результатів надходить із case-studies або внутрішніх звітів компаній, але незалежні рандомізовані контрольовані дослідження у цьому контексті трапляються рідко, що знижує надійність висновків про універсальну ефективність. По-друге, генеративні моделі можуть створювати неточні або навіть хибні твердження, особливо якщо вони не підтримуються достовірними джерелами – без RAG чи факт-верифікації ризик помилкового представлення продукту чи умов може бути значним. По-третє, регуляторний і етичний виміри часто залишаються поза увагою: рекомендації фінансових продуктів вимагають прозорості, пояснення вартості, ризиків і умов, що не завжди забезпечується складними моделями або швидкими генеративними скриптами. Нарешті, у літературі зафіксовано, що доменна адаптація має критичне значення: моделі, не натреновані на фінансові та страхові діалоги або ануїтетні продукти, часто демонструють знижену релевантність та зменшену довіру клієнтів або агентів до результатів.

На основі дослідження джерел [41, 42, 43, 44, 45] сформовано узагальнений перелік методів та моделей штучного інтелекту з розрахунком частоти їх застосування. Загалом виявлено 156 згадок, що охоплюють 17 унікальних методів. Перелік найбільш вживаних моделей і методів ШІ наведено на рисунку 5.

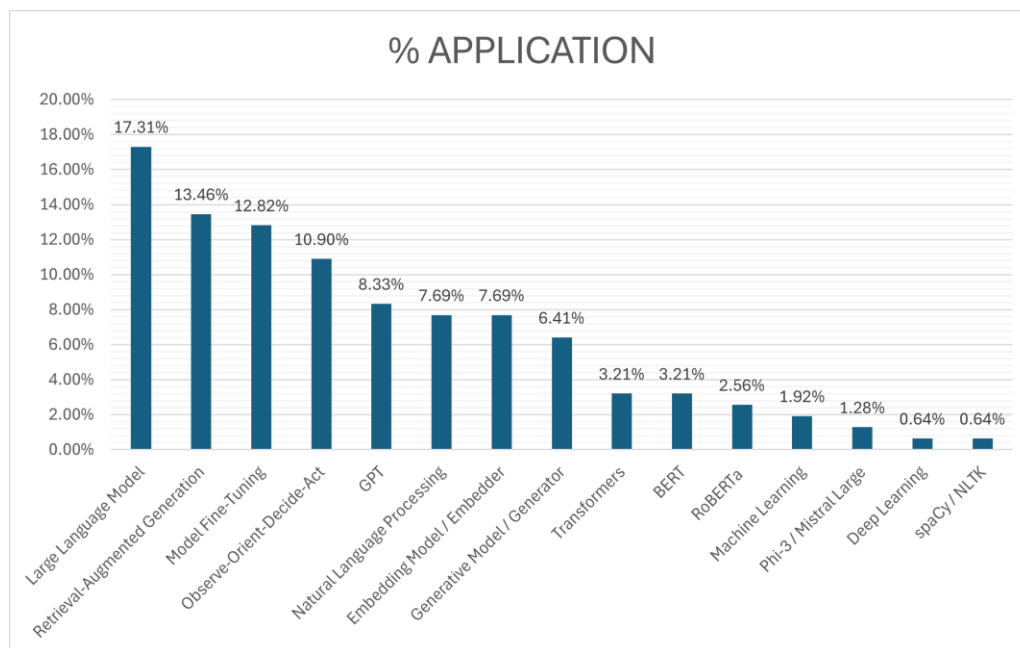


Рис. 5. Найпопулярніші моделі і методи ІІІ у процесі презентації пропозицій

Подання заявки та оцінка ризиків клієнта. На цьому етапі відбувається перехід від консультативно-інформаційної роботи з клієнтом до формалізованої взаємодії зі страховою компанією. Незалежний агент виконує роль не лише посередника у зборі даних, але й консультанта, який забезпечує відповідність обраного фінансового продукту реальним потребам і фінансовим можливостям клієнта. Таким чином, агент виступає первинним “фільтром”, що зменшує ризик невідповідності заявки вимогам страховика. Подання заявки включає заповнення пакету офіційних документів, які містять персональні, фінансові та ідентифікаційні відомості клієнта. На практиці цей процес дедалі частіше реалізується через цифрові платформи, що дозволяють динамічну валідацію даних, інтеграцію з зовнішніми базами, автоматизовану перевірку повноти інформації та відстеження статусу заявки [46, 47, 48, 49]. Для незалежного агента це означає можливість мінімізувати рутинні адміністративні помилки та зосередитися на забезпеченні відповідності продукту регуляторним нормам і очікуванням клієнта. Після надсилання заявки до страхової компанії починається процес оцінки ризиків клієнта також відомий як андеррайтинг. У випадку ануїтетів андеррайтинг зосереджується переважно на фінансових характеристиках клієнта: рівні доходів, наявності активів та загальній платоспроможності.

У разі відмови страхової компанії у випуску ануїтетного полісу після завершення андеррайтингу процес не вважається остаточно завершеним. Незалежний страховий агент у такій ситуації виконує роль консультанта, пояснюючи клієнту загальні причини відмови. Водночас агент спільно з клієнтом повертається до етапу аналізу фінансових потреб і розгляду альтернативних варіантів, зокрема інших типів ануїтетів або страхових та інвестиційних

продуктів, що краще відповідають профілю ризику та фінансовим можливостям. Таким чином, навіть у випадку відмови зберігається безперервність процесу обслуговування клієнта та забезпечується адаптивність продажу до індивідуальних обставин.

Сучасні технології автоматизації та алгоритми штучного інтелекту дедалі активніше застосовуються для оцінки ризиків, що дозволяє скоротити час розгляду, підвищити точність аналізу та зменшити вплив людського фактору [5]. Таким чином, подання заявки та андеррайтинг у сфері продажу ануїтетів слід розглядати не лише як адміністративно-формальний етап, а як комплексну процедуру, що забезпечує баланс між інтересами клієнта, фінансовою стабільністю страховика та професійною відповідальністю незалежного агента.

У низці досліджень показано, що ансамблеві моделі і гібридні рішення здатні забезпечити високі показники точності та оперативності в андеррайтингу. Наприклад, у статті [50] описується використання моделі XGBoost, яка досягає 0.91 за метрикою AUC у медичному андеррайтингу, що значно перевищує базовий випадковий прогноз. Також дослідження [51] демонструє, що моделі із прогнозною аналітикою здатні скорочувати час оцінки ризиків та підвищити ефективність прийняття рішень, дозволяючи андеррайтерам зосередитися на складніших випадках, тоді як рутинні або низькоризикові заявки обробляються автоматично. Крім того, робота [52] показує, що застосування методів XAI, таких як SHAP, local effects та rule extraction у поєднанні з ML-моделлю дозволяє зберігати прозорість рішень, що сприяє підвищенню довіри клієнтів і відповідає регуляторним вимогам, без значної втрати в точності моделі.

Незважаючи на значні переваги, існують важливі недоліки та прогалини, що обмежують практичне застосування моделей. Історичні дані можуть містити

соціально-економічні непрямі індикатори, які моделі невірно використовують, призводячи до дискримінаційних результатів. Автори [53] зазначають, що автоматизація може підвищити оперативну ефективність, але водночас збільшує ризик дискримінації, коли нейтральні ознаки стають непрямими індикаторами для заборонених характеристик. Також існує відсутність прозорості та пояснюваності у тих випадках, коли моделі використовують спрощені ML-архітектури або коли логіка рішення належить стороннім розробникам. Без ХАІ або методів rule extraction агенти та регулятори іноді не мають змоги зрозуміти, чому заявка була відхилена, що підтверджується авторами [12], які зазначають, що в практиках андеррайтингу більшість моделей це все ще “чорні скриньки”, і що методи, які забезпечують інтерпретацію, використовуються, але не універсально. Крім того, існує проблема з новими або

нетиповими заявами: моделі часто створені для “середньостатистичних” випадків, але при нестандартних або складних умовах, або для клієнтів із нестандартним ризиковим профілем, потрібне залучення людини, що відчутно підвищує ресурсоємність. Нарешті, інтеграція зовнішніх API, правовий та нормативний нагляд часто є фрагментованими і повільними, що може стримувати адаптивність і масштабільність систем.

Проведений аналіз наукових джерел [5, 12, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53] дозволив сформувати список методів і моделей штучного інтелекту та визначити відсоток їх використання у дослідженнях. Загальна кількість згадок складає 150, з яких 35 належать до унікальних методів. Найпоширеніші моделі й методи III за частотою застосування відображено на рисунку 6.

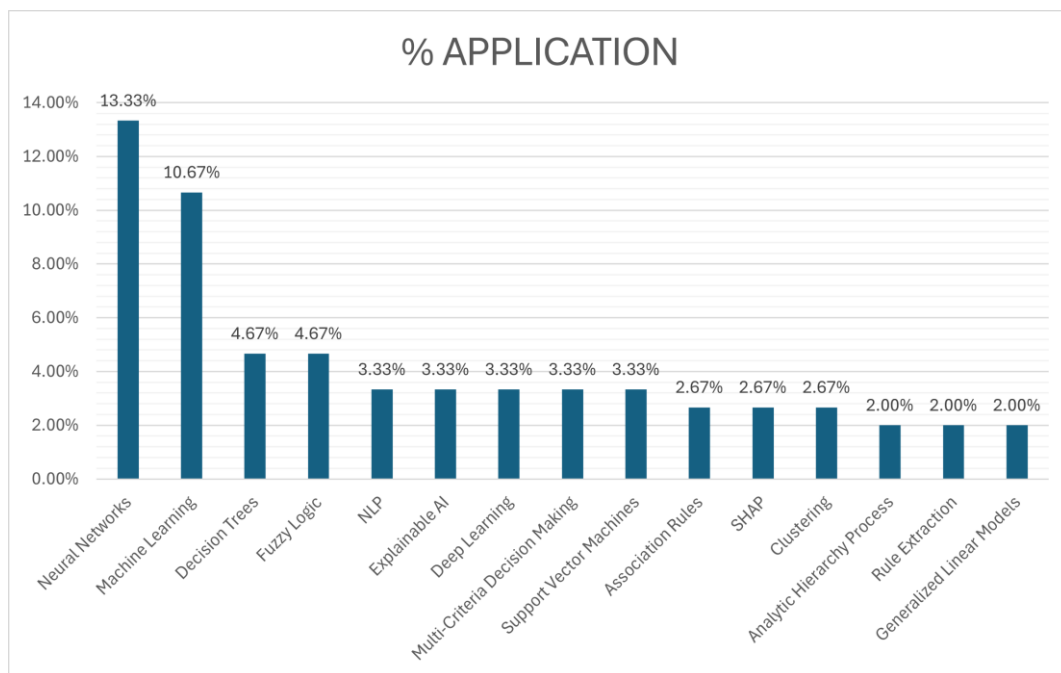


Рис. 6. Найпопулярніші моделі і методи III у процесі подання заявки та оцінці ризиків

Оформлення та доставка ануїтетного полісу.

Оформлення та доставка ануїтетного полісу становлять завершальний етап у процесі продажу ануїтетів і мають вирішальне значення для підтвердження юридичної сили договору та формування довіри клієнта до страховика. Після позитивного рішення андеррайтингу страхова компанія випускає поліс, який закріплює ключові умови: розмір премій, порядок і строки виплат, а також інші договірні зобов'язання. На цьому етапі незалежний страховий агент виконує функцію посередника та консультанта: він перевіряє коректність виданого документа, пояснює клієнту його зміст і практичні наслідки, а також контролює своєчасність отримання полісу.

Традиційно доставка полісів здійснювалася у паперовій формі поштовими відправленнями, що було пов'язано з часовими затримками та ризиком втрати документів [4, 54, 55]. Сучасні цифрові рішення докорінно трансформували цей процес, забезпечивши

можливість електронного оформлення, цифрового підпису та миттєвої доставки електронної копії полісу клієнту. Такі технології знижують операційні витрати, підвищують точність і прозорість процесу, а також дозволяють клієнтам у зручний спосіб зберігати та відстежувати свої документи [56].

Інтеграція автоматизованих систем і алгоритмів штучного інтелекту додатково оптимізує етап оформлення: від виявлення помилок у даних до генерації персоналізованих повідомлень про активацію полісу. Для незалежного агента це означає перехід від рутинної адміністративної роботи до більш консультативної та сервісно-орієнтованої ролі, яка спрямована на підвищення клієнтського досвіду та довгострокового утримання клієнтів [57, 58]. Таким чином, оформлення та доставка ануїтетного полісу в сучасних умовах слід розглядати не як формальну передачу документа, а як комплексний, цифрово-трансформований процес, що забезпечує юридичну

завершеність угоди, зручність для клієнта та професійну відповідальність агента.

ШІ-інструменти, зокрема методи роботизованої автоматизації процесів у поєднанні з технологіями документної обробки природної мови і методами оркестрації робочого процесу, продемонстрували значне скорочення часу обробки заяв і документів у страхуванні. Наприклад, автор [59] повідомляє про зменшення часових витрат для стандартних форм обробки претензій до менше ніж 5 хвилин порівняно з 72 годинами до автоматизації; це майже 90% скорочення часу при високій точності стандартних форм. Також робота [3] підкреслює, що методи роботизованої автоматизації процесів разом із автоматизацією обробки документів та прогнозною аналітикою полегшують видачу полісів, зменшуючи операційні витрати і підвищуючи ефективність робочих процесів у галузі ануїтетів і страхування життя. Загалом, ці методи дозволяють значно зменшити ручну працю, підвищити точність введення даних та пришвидшити випуск поліса, що позитивно впливає на якість обслуговування клієнтів і задоволеність користувачів.

Разом з перевагами існують суттєві обмеження, які не дозволяють універсально застосовувати ці рішення без відповідних заходів. По-перше, методи роботизованої автоматизації процесів дуже чутливі до змін інтерфейсів користувача, структури форм чи послідовностей етапів: оновлення у програмному

забезпеченні можуть призвести до помилок автоматизованих сценаріїв, що вимагає постійного технічного обслуговування та людського втручання. По-друге, виняткові або нестандартні випадки, наприклад, сильно пошкоджені документи або медичні форми з незвичним форматуванням все ще потребують ручної або напівавтоматичної обробки, оскільки автоматичні методи оптичного розпізнавання символів та обробки природної мови часто не справляються з високим рівнем шуму або несподіваними структурами. По-третє, існує ризик помилок у масовому випуску поліса, якщо автоматизація працює без надійного моніторингу: наприклад, у документній автоматизації, якщо система визнає неправильні або неповні дані як коректні, це може призвести до юридичних чи фінансових наслідків. Автори, що аналізують вплив цифрової трансформації, відзначають також загрози кібербезпеки і порушення конфіденційності, особливо коли дані передаються між системами, або коли сторонні AI-сервіси беруть участь у обробці документів [13].

У ході аналізу літературних джерел [3, 4, 13, 54, 55, 56, 57, 58, 59] було систематизовано методи й моделі штучного інтелекту з урахуванням відсотка їх використання. Загальна кількість зафіксованих згадувань становить 87, при цьому ідентифіковано 70 унікальних методів. Частотний розподіл найбільш популярних моделей і методів ШІ представлено на рисунку 7.

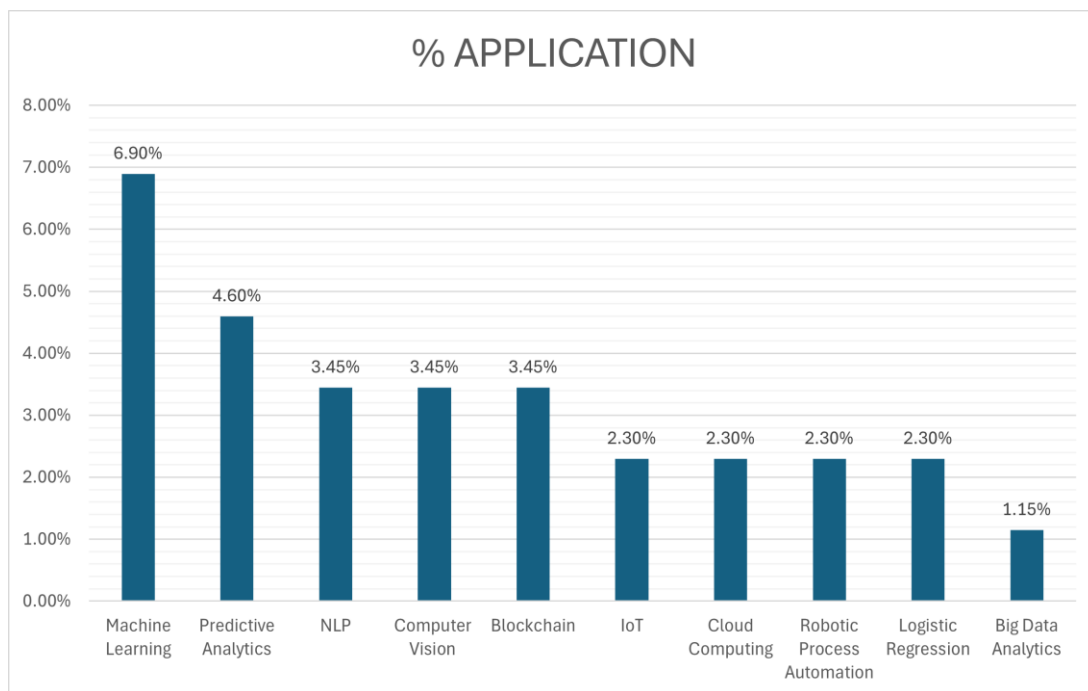


Рис. 7. Найпопулярніші моделі і методи ШІ у процесі оформлення та доставки ануїтетного полісу

Післяпродажна взаємодія та утримання клієнтів. Після оформлення та доставки ануїтетного полісу починається етап післяпродажної взаємодії та утримання клієнта, що має не менше значення, ніж первинний продаж. Незалежний страховий агент на цьому етапі виконує функції консультанта та посередника між клієнтом і страховою компанією:

роз'яснює умови полісу, контролює дотримання періоду “free look”, відповідає на запитання клієнта та забезпечує належний супровід у випадку змін життєвих обставин чи фінансових цілей. Недостатня увага до післяпродажного супроводу може призвести до відтоку клієнтів, репутаційних втрат і зниження довіри до агента [60, 61, 62].

Сучасні клієнти, яких часто відносять до “нового покоління клієнтів сервісу”, характеризуються вищими очікуваннями, орієнтацією на прозорість та безперервність комунікації [63, 64]. У відповідь на ці виклики ключову роль починають відігравати цифрові інструменти, зокрема CRM-системи та технології штучного інтелекту. Використання ШІ та машинного навчання дозволяє агентам і страховим компаніям прогнозувати ризик відтоку клієнтів, сегментувати їх за рівнем задоволеності, формувати персоналізовані стратегії утримання та оптимізувати клієнтський досвід завдяки аналізу поведінкових даних і настроїв [65, 66, 67, 68, 69].

У контексті ануїтетів, що є довгостроковими фінансовими інструментами із суттєвими зобов'язаннями, ефективна післяпродажна взаємодія набуває особливої ваги. Вона сприяє підтримці стабільних відносин між клієнтом та агентом, управлінню очікуваннями, максимізації життєвої цінності клієнта, а також створює підґрунтя для нових фінансових рішень у майбутньому.

У дослідженні [70] показано, що ансамблеві моделі та підходи глибокого навчання здатні досягати дуже високих показників у задачах утримання клієнтів – наприклад, на страховому наборі даних модель досягла точності 95.96% та високого F1-score. Це свідчить, що у контрольованих умовах із хорошими даними ШІ-системи можуть ефективно ідентифікувати клієнтів із ризиком втрати і підтримувати їх утримання. Інші дослідження підтверджують, що класифікаційні моделі як XGBoost і Random Forest залишаються конкурентними, особливо коли балансування класів та підбір ознак виконуються коректно. Наприклад, дослідження [71] вказують, що застосування відбору ознак, балансування вибірки та ensemble-методів може забезпечити покращення точності і F1-метрики на 5-10 % у порівнянні зі стандартними базовими моделями. Крім того, моделі застосовують індекс лояльності клієнтів та аналіз настроїв відгуків, щоб краще

зрозуміти задоволення клієнтів і емоційне ставлення – це допомагає коригувати персоналізовані кампанії утримання.

Незважаючи на обнадійливі результати, існують значні обмеження, що вповільнюють трансформацію потенціалу у практичне впровадження. По-перше, багато моделей демонструють високі показники за метриками Accuracy / F1 / AUC у контрольованих або дослідницьких умовах, але при застосуванні у реальних середовищах результати часто бувають значно гіршими – це обумовлено шумом даних, неповними ознаками та змінами поведінки клієнтів. У тому ж дослідженні [70] зазначено, що хоча для набору даних для страхової галузі досягнуто Accuracy на рівні 95.96%, для інших секторів таких, як телеком або інтернет-постачання послуг моделі мали більшу нестабільність. По-друге, зростає ризик порушення приватності, особливо коли моделі використовують великі обсяги даних про взаємодії клієнтів або відкриті тексти відгуків. У контексті законодавства США чи ЄС не завжди є чіткі рамки для дозволу використання таких даних. По-третє, етичні та регуляторні виклики: надмірна персоналізація чи сегментація може призводити до відчуття дискримінації або несправедливості, якщо певні групи клієнтів автоматично виключаються з вигідних пропозицій на основі моделей. І нарешті, ресурсні та операційні бар'єри: підтримка моделей, що працюють у production, вимагає інфраструктури, моніторингу, перетренування, а також відповідних команд та спеціалістів, що не завжди доступно.

На основі опрацювання наукових джерел [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71] складено перелік методів і моделей штучного інтелекту з визначенням частоти їх застосування у дослідженнях. Загалом зафіксовано 67 згадок, що відповідають 19 унікальним методам. Найбільш поширені моделі та методи ШІ подано на рисунку 8.

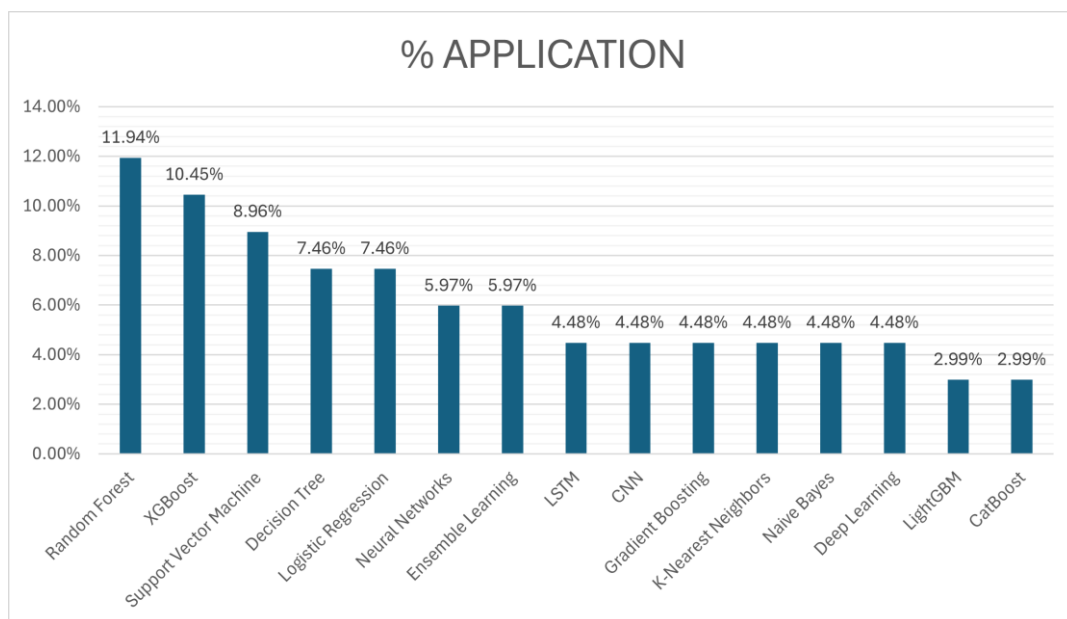


Рис. 8. Найпопулярніші моделі і методи ШІ у процесі післяпродажна взаємодія та утримання клієнтів

Практичне впровадження. Практична реалізація запропонованої процесної декомпозиції із зіставленням моделей штучного інтелекту з етапами бізнес-процесів продажу ануїтетів доцільна на основі поетапного підходу що охоплює підготовку, інтеграцію ШІ-рішень та подальший моніторинг їх ефективності. Такий підхід ґрунтується на узагальненні сучасних платформних рішень і прикладних кейсів, представлених у науковій літературі [2, 3, 7, 13, 37, 70], та враховує специфіку діяльності незалежних страхових агентів, які, як правило, функціонують в умовах обмежених ресурсів.

На підготовчому етапі доцільним є проведення аудиту наявних бізнес-процесів і даних клієнтської взаємодії. Ключовим завданням є подолання фрагментованості інформації шляхом інтеграції з CRM-системами, що розглядається як один з базових чинників успішного впровадження ШІ-рішень [2, 4]. Для початкового етапу генерації лідів можуть застосовуватися відносно прості та інтерпретовані ML-моделі, зокрема логістична регресія або ансамблеві методи, інтегровані з інструментами автоматизованого маркетингу. Як свідчать результати емпіричних досліджень, впровадження таких підходів навіть у невеликих агентствах забезпечує суттєве зростання конверсії за рахунок аналізу історичних клієнтських даних [9].

На етапі виявлення та оцінки потреб клієнтів доцільним є використання NLP-інструментів для аналізу транскриптів дзвінків і текстових комунікацій. Застосування моделей класу BERT або сучасних генеративних моделей дозволяє автоматизувати первинну інтерпретацію запитів клієнтів і скоротити час попередньої оцінки, що підтверджується результатами впровадження conversational AI у страхових організаціях [21, 23]. Для незалежних агентів практичним є поетапний перехід від типових рішень до доменно-орієнтованої кастомізації.

Під час пошуку та підбору ануїтетних продуктів ефективними є гібридні рекомендаційні системи, які поєднують контентно-орієнтовані та колаборативні підходи. Такі системи можуть бути інтегровані з базами даних страхових компаній через програмні інтерфейси. Дослідження показують, що застосування нейронних моделей для оцінювання ануїтетних портфелів дозволяє суттєво зменшити похибку розрахунків і підвищити якість прийняття рішень [37]. Для невеликих агентів можливе використання спрощених локальних моделей у поєднанні з табличними інструментами для порівняння альтернатив.

На етапах презентації пропозицій і консультації клієнтів генеративні моделі ШІ можуть застосовуватися для підготовки персоналізованих матеріалів і сценаріїв комунікації. За даними прикладних досліджень, це дозволяє суттєво скоротити час підготовки презентацій та підвищити рівень індивідуалізації консультацій [43]. Водночас ключова роль у фінальному рішенні залишається за агентом, що відповідає вимогам регуляторів і принципам відповідального використання ШІ.

Подання заявок, андеррайтинг та оформлення полісів можуть бути частково автоматизовані за допомогою моделей оцінювання ризиків і агентних ШІ-рішень, орієнтованих на оркестрацію документообігу. Практичні кейси свідчать про істотне скорочення часу обробки заявок і зниження адміністративного навантаження на агентів [46, 50, 55].

На післяпродажному етапі застосування моделей прогнозування відтоку клієнтів у поєднанні з персоналізованими комунікаційними кампаніями дозволяє підвищити рівень утримання клієнтів та довгострокову цінність портфеля [70].

Завершальним елементом практичного впровадження є постійний моніторинг і оптимізація ШІ-рішень. Доцільним є використання A/B-тестування для порівняння автоматизованих і традиційних підходів, а також контроль ключових показників ефективності, зокрема конверсії, рентабельності інвестицій та точності моделей. Важливим аспектом залишається дотримання регуляторних вимог SEC та NAIC, що зумовлює необхідність застосування методів пояснюваного ШІ для обґрунтування прийнятих рішень [12, 40].

Отже, впровадження ШІ дозволяє автоматизувати значну частку рутинних операцій і змістити фокус діяльності незалежного страхового агента на консультативну та клієнтоорієнтовану складову, що підтверджує практичну доцільність запропонованого підходу [7].

Проблеми впровадження ШІ. Попри помітний прогрес у впровадженні інструментів штучного інтелекту (ШІ) у сфері страхування, зокрема у продажах ануїтетів, залишається ряд суттєвих викликів і проблем, що ускладнюють їхнє широке використання. Одним із ключових аспектів є відсутність уніфікованої класифікації та систематизації ШІ-рішень, що ускладнює визначення їхньої ефективності та вибір оптимальних моделей для страхових компаній і агентів. Висока складність страхових продуктів, посилена жорсткими регуляторними вимогами, зумовлює потребу в адаптивних рішеннях ШІ, які можуть поєднувати глибоку аналітику великих даних із персоналізованим підходом до клієнтів.

Серед технічних бар'єрів впровадження помітними є проблеми інтеграції інноваційних рішень із застарілими інформаційними системами, обробка фрагментованих та неповних даних, а також забезпечення прозорості алгоритмів, що суттєво впливає на довіру клієнтів і регуляторів. Важливою є також проблема оцінки ефективності інвестицій у ШІ, яка залишається складною через нестачу довготривалих досліджень і практичних кейсів.

Необхідність дотримання законодавчих норм щодо захисту персональних даних та етичних стандартів висуває додаткові вимоги до проектування та використання ШІ-систем. Зокрема, надмірна персоналізація може призводити до несправедливої дискримінації певних груп клієнтів, що також потребує контролю і регулювання. Крім того, впровадження ШІ

вимагає значних ресурсів для підтримки, моніторингу і періодичного навчання моделей, а також забезпечення відповідної кваліфікації персоналу. Отже, ефективно впровадження ШІ можливе лише за умови комплексного підходу, що поєднує технічні, організаційні та регуляторні аспекти, а також інвестиції в людський капітал і розвиток корпоративної культури.

Висновки. Штучний інтелект дедалі активніше проникає у всі ключові етапи бізнес-процесів продажу ануїтетів, формуючи нову архітектуру створення цінності як для клієнтів, так і для незалежних страхових агентів. Вплив технологій ШІ не є однорідним: різні його типи по-різному трансформують процеси, підвищуючи їхню ефективність, точність та гнучкість. Проведений аналіз сучасної наукової та прикладної літератури показав, що можна виокремити три базові категорії ШІ, що знаходять практичне застосування у сфері страхування: аналітичний, генеративний та агентний.

Аналітичний ШІ ґрунтується на методах машинного навчання, орієнтованих на роботу зі структурованими даними. У контексті продажу ануїтетів він виконує функції предиктивного скорингу потенційних клієнтів, оцінки фінансових ризиків, а також виявлення випадків шахрайства. Такий підхід дозволяє підвищувати точність прогнозів, скорочувати ймовірність помилкових рішень і знижувати транзакційні витрати, що безпосередньо впливає на рентабельність діяльності агента. Використовується на етапах “Генерація лідів та пошук нових клієнтів”, “Пошук і підбір продукту страхової компанії” та “Оформлення та доставка ануїтетного полісу”.

Генеративний ШІ відкриває можливості роботи з неструктурованими даними: текстами, аудіо та візуальними матеріалами, та створення нового контенту. У сфері страхування його ключовими точками застосування є гіперперсоналізована комунікація з клієнтами на етапах “Виявлення та оцінка потреб клієнтів” та “Післяпродажна взаємодія та утримання клієнтів”, автоматизоване резюмування складних документів для андеррайтингу на етапі “Подання заявки та оцінка ризиків клієнта” та підготовка електронних листів, звітів і презентацій на етапі “Презентація пропозицій та консультація клієнта”. Використання таких інструментів не лише зменшує адміністративне навантаження, а й підвищує якість взаємодії з клієнтом завдяки більш цілеспрямованій та адаптивній комунікації.

Агентний ШІ являє собою нову парадигму, у межах якої автономні цифрові агенти здатні самостійно оркеструвати цілі робочі процеси. Це включає автоматизацію онбордингу клієнтів, обробку стандартних запитів чи навіть повний супровід адміністративних операцій. Мінімізація людського втручання в рутинні завдання створює для страхових агентів можливість зосередитися на стратегічно важливих аспектах роботи – побудові довіри, формуванні довгострокових відносин і розвитку клієнтської бази.

Емпіричні дані, наведених графіків, свідчать про те, що впровадження зазначених технологій вже демонструє відчутні результати: підвищення показників успішності нових агентів на 10–20%, зростання коефіцієнта конверсії продажів у тих самих межах та суттєве скорочення адміністративного навантаження, яке традиційно займає понад половину робочого часу агентів. Це свідчить про трансформаційний характер ШІ, який не лише оптимізує окремі етапи бізнес-процесу, а й формує нову логіку функціонування незалежного страхового агента в умовах цифрової економіки.

Подальше дослідження. Незважаючи на значні досягнення у впровадженні інструментів штучного інтелекту у сфері продажу ануїтетів, низка критичних проблем залишається невирішеними, що створює передумови для подальших досліджень.

По-перше, відсутність уніфікованої класифікації та систематизації застосовуваних ШІ-рішень суттєво ускладнює їхню порівняльну оцінку, а отже, й обґрунтований вибір оптимальних моделей для страхових агентів та компаній.

По-друге, висока складність ануїтетних продуктів, посилена вимогами регуляторів (SEC та NAIC), зумовлює необхідність розробки адаптивних ШІ-систем, здатних інтегрувати аналіз великих даних з індивідуалізованим підходом до клієнта.

По-третє, проблема прозорості алгоритмів суттєво обмежує довіру як клієнтів, так і регуляторних органів до автоматизованих рішень.

Окрім того, недостатньо вивченою залишається ефективність ШІ у довгостроковому управлінні ризиками, консультуванні клієнтів та післяпродажному супроводі. У цьому контексті особливої ваги набуває подальше дослідження з визначенням відсоткового внеску ШІ та людського фактору в кожному з ключових процесів – від оцінки потреб клієнта до моніторингу контрактів. Кількісна оцінка такого залучення дозволить не лише об’єктивно порівнювати ефективність гібридних моделей, але й розробити рекомендації щодо оптимального балансу автоматизації та людської експертизи, що є критичним для підвищення довіри, зниження ризиків та забезпечення регуляторної відповідності.

Для подальшого уточнення окреслених напрямів доцільним є посилення емпіричної складової досліджень, спрямованих на кількісну оцінку ефектів упровадження інструментів штучного інтелекту в діяльність незалежних страхових агентів. Насамперед перспективними є прикладні кейс-стаді впровадження у реальних агентствах, зокрема порівняльний аналіз груп незалежних агентів, які застосовують ШІ-рішення для генерації лідів, із агентами, що використовують традиційні підходи. Такі дослідження дозволять оцінити вплив ШІ на показники економічної ефективності на основі даних CRM-систем і стандартних статистичних методів аналізу.

Другим важливим напрямом є експериментальні дослідження взаємодії людського чинника та автоматизованих систем прийняття рішень. Подібні

методології з використанням cluster analysis та Brown model для DSS в стратегічному плануванні цифрових технологій можуть бути адаптовані для оцінки ШІ в страхуванні [72]. Зокрема, аналіз застосування А/В-тестування на етапах підготовки презентацій і консультацій клієнтів, дозволить порівняти результати використання генеративних ШІ-інструментів із традиційною ручною підготовкою матеріалів. Поєднання кількісних показників (рівень утримання клієнтів, відтік) з опитуваннями клієнтів щодо якості взаємодії створює основу для оцінки довгострокових ефектів використання ШІ в сегменті анuitетів, для якого наразі бракує систематизованих емпіричних даних.

Реалізація зазначених напрямів забезпечить перехід від переважно оглядових і концептуальних досліджень до формування практично орієнтованих рекомендацій, що сприятимуть підвищенню ефективності та зрілості застосування штучного інтелекту в галузі продажу анuitетів.

References

1. Precedence Research. *Artificial Intelligence (AI) in Insurance Market Size and Forecast 2024 to 2034* Electronic resource. 2025. Available from: <https://www.precedenceresearch.com/artificial-intelligence-in-insurance-market>
2. Kaznowska O. A. *Impact Analysis of New Technologies on Business Model in Insurance Industry: Artificial Intelligence* : thesis Electronic resource. 2023. Available at: <https://search.proquest.com/openview/015006b04e34547cc4f392bf8b0c8c7d/1>
3. Malali N. *AI, Technology, and Digital Transformation in Life and Annuity Insurance and Actuaries* Electronic resource. 2025. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Nihar-Malali/publication/390965633_AI_Technology_and_Digital_Transformation_in_Life_and_Annuity_Insurance_and_Actuaries/links/6806575bd1054b0207dbb4e1/AI-Technology-and-Digital-Transformation-in-Life-and-Annuity-Insurance-and-Actuaries.pdf
4. Rao A., Soofastaei A. *Artificial Intelligence in Insurance: Transforming Risk Management and Customer Experience / Advanced Analytics for Industry 4.0*. Boca Raton : CRC Press, 2025. doi:10.1201/9781003186823-11.
5. Pandiri L. *The Complete Compendium of Digital Insurance Solutions: Life, Health, Auto, Property, and Specialized Coverage in the Age of AI, Automation, and Intelligent Systems*. New York : Apress, 2025.
6. Ahmad S., Karim R., Sultana N., Lima R. *InsurTech: Digital Transformation of the Insurance Industry*. Bingley : Emerald Publishing Limited, 2025. doi:10.1108/978-1-83753-750-120251016.
7. McKinsey & Company. *The future of AI in the insurance industry* Electronic resource. 2025. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/the-future-of-ai-in-the-insurance-industry>
8. González-Flores L., Rubiano-Moreno J., Gómez G. S. *The relevance of lead prioritization: a B2B lead scoring model based on machine learning* Electronic resource. 2025. Available from: https://www.researchgate.net/publication/390128355_The_relevance_of_lead_prioritization_a_B2B_lead_scoring_model_based_on_machine_learning
9. Wu M., Andreev P., Benyoucef M. The state of lead scoring models and their impact on sales performance. *Information Technology and Management*. 2023. Vol. 25, iss. 1. P. 69–98. doi:10.1007/s10799-023-00388-w.
10. Nygård R., Mezei J. Automating Lead Scoring with Machine Learning: An Experimental Study. *Proceedings of the 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*. 2020. P. 1439–1448. Electronic resource. Available at: <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/server/api/core/bitstreams/1d4e8c2d-4096-4628-b4f8-4f6086aa6b53/content>
11. Brohn F., Löwer M. Predicting lead conversion opportunities with machine learning in small and medium sized enterprises. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 204. P. 55–63. doi:10.1016/j.procs.2022.08.007.
12. Owens E., Sheehan B., Mullins M., Cunneen M., Ressel J., Castignani G. *Explainable artificial intelligence (XAI) in insurance*. *Risks*. 2022. Vol. 10, iss. 12. P. 230. doi:10.3390/risks10120230.
13. Dalessandro B., Perlich C., Raeder T. Probabilistic Modeling of a Sales Funnel to Prioritize Leads. *Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2015. P. 1751–1758. doi:10.1145/2783258.2788578.
14. Sinha S., Lee Y. M. Challenges with developing and deploying AI models and applications in industrial systems. *Discover Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 4. P. 55. doi:10.1007/s44163-024-00151-2.
15. Malali N. *Automated Machine Learning in Insurance* Electronic resource. 2024. Available at: https://www.researchgate.net/publication/383428306_Automated_Machine_Learning_in_Insurance
16. Løberg I. B. Assessments of Digital Client Representations: How Frontline Workers Reconstruct Client Narratives from Fragmented Information. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 2022. Vol. 33, iss. 2. P. 1–11. doi:10.1093/jopart/muac017.
17. Stead D. Needs Assessment and Data Analytics: Understanding Your Constituencies. *Making Connections: Interdisciplinary Approaches to Cultural Diversity*. 2019. Vol. 20, iss. 1. P. 1–17. Electronic resource. Available at: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1008&context=makingconnections>
18. Das S., Markowitz H., Scheid J., Statman M. Portfolio Optimization with Mental Accounts. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*. 2010. Vol. 45, iss. 2. P. 311–334. doi:10.1017/S0022109010000141.
19. Svensson J., Talovic A. *Customer Discovery for Developing Business Models within Established Companies* : thesis Electronic resource. 2015. Available at: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/e60ac621-1025-4465-b820-c9a4544366a5/content>
20. Estabrooks P. A., Harden S. M., Almeida F. A., Hill J. L., Johnson S. B., Porter G. C., Greenawald M. H. Using a customer discovery process to enhance the potential dissemination and scalability of a family healthy weight program for rural communities and small towns. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2024. Vol. 21, iss. 1. P. 57. doi:10.1186/s12966-024-01605-7.
21. Malali N., Madugula S. R. P. Transforming Life and Annuity Sales: A Framework for AI-Powered Digital Transformation Using MCP, Salesforce, And Spring Boot. *International Journal of Innovative Research in Technology*. 2025. Vol. 12, iss. 2. Electronic resource. Available at: https://www.researchgate.net/publication/393328989_Transforming_Life_and_Annuity_Sales_A_Framework_for_AI-Powered_Digital_Transformation_Using_MCP_Salesforce_And_Spring_Boot
22. Malali N. *Advanced AI in Wealth Management: Functional Transformation and Intelligent Orchestration Across the Client Lifecycle*. Electronic resource. 2025. Available at: https://www.researchgate.net/publication/390947298_Advanced_AI_in_Wealth_Management_Functional_Transformation_and_Intelligent_Orchestration_Across_the_Client_Lifecycle
23. Fernández-Martínez F., Luna-Jiménez C., Kleinlein R., Griol D., Callejas Z., Montero J. M. Fine-Tuning BERT Models for Intent Recognition Using a Frequency Cut-Off Strategy for Domain-Specific Vocabulary Extension. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, iss. 3. P. 1610. doi:10.3390/app12031610.
24. Na S.-O., Kim Y.-M., Cho S.-H. Insurance Question Answering via Single-turn Dialogue Modeling. *Proceedings of the 2nd Workshop on When Creative AI Meets Conversational AI (CAI2)*. 2022. P. 35–41. Electronic resource. Available at: <https://aclanthology.org/2022.cai-1.5.pdf>
25. Jia Y. *A Deep Learning System for Domain-Specific Speech Recognition*. Electronic resource. 2023. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2303.10510>
26. Bäckström T. *Privacy in Speech Technology*. Electronic resource. 2023. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2305.05227>

27. Wilcox L., Brewer R. N., Diaz F. AI Consent Futures: A Case Study on Voice Data Collection with Clinicians. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2023. Vol. 7, iss. CSCW2. P. 316. doi:10.1145/3610107.
28. Ahmed N., Saha A. K., Noman M. A. A., Jim J. R., Mridha M. F., Kabir M. M. Deep learning-based natural language processing in human-agent interaction: Applications, advancements and challenges. *Natural Language Processing Journal*. 2024. Vol. 9. P. 100112. doi:10.1016/j.nlp.2024.100112.
29. Wu D., Li X. A Systematic Literature Review of Financial Product Recommendation Systems. *Information*. 2025. Vol. 16, iss. 3. P. 196. doi:10.3390/info16030196.
30. Zuo Q., Zhou Y., Zhuang S. Optimal Insurance with Rank-Dependent Utility and Increasing Indemnities. *Mathematical Finance*. 2019. Vol. 29, iss. 2. P. 659–692. doi:10.48550/arXiv.1509.04839.
31. Birghila C., Boonen T. J., Ghossoub M. *Optimal Insurance under Maxmin Expected Utility*. Electronic resource. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2010.07383>
32. Li Y., Liu K., Satapathy R., Wang S., Cambria E. *Recent Developments in Recommender Systems: A Survey*. Electronic resource. 2023. Available from: <https://arxiv.org/abs/2306.12680>
33. Mazzocchi A., Naldi M. The Expected Utility Insurance Premium Principle with Fourth-Order Statistics: Does It Make a Difference?. *Algorithms*. 2020. Vol. 13, iss. 5. P. 116. doi:10.3390/a13050116.
34. Bilbao-Terol A., Arenas-Parra M., Quiroga-García R., Bilbao-Terol C. An extended best-worst multiple reference point method: application in the assessment of non-life insurance companies. *Operational Research*. 2022. P. 5323–5362. doi:10.1007/s12351-022-00731-z.
35. Beiragh R. G., Alizadeh R., Kaleibari S. S., Cavallaro F., Zolfani S. H., Bausys R., Mardani A. An integrated Multi-Criteria Decision Making Model for Sustainability Performance Assessment for Insurance Companies. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, iss. 3. P. 789. doi:10.3390/su12030789.
36. Chakraborty S., Yeh C.-H. A simulation comparison of normalization procedures for TOPSIS. *2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering*. 2009. P. 1815–1820. doi:10.1109/ICCIE.2009.5223811.
37. Xiong H., Xu J., Mamon R., Zhao Y. ResPoNet: A Residual Neural Network for Efficient Valuation of Large Variable Annuity Portfolios. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, iss. 12. P. 1916. doi:10.3390/math13121916.
38. Lim H. B., Shyamalkumar N. D., Tao S. Valuation of variable annuity portfolios using finite and infinite width neural networks. *Insurance: Mathematics and Economics*. 2025. Vol. 120. P. 269–284. doi:10.1016/j.insmatheco.2024.12.005.
39. Spedicato G. A., Savino G. Recommender Systems for Insurance Marketing. *Variance*. 2022. Vol. 15, iss. 1. Electronic resource. Available at: <https://variancejournal.org/article/31370-recommender-systems-for-insurance-marketing>
40. International Association of Insurance Supervisors. *Application Paper on the supervision of artificial intelligence*. Electronic resource. 2025. Available at: <https://www.iais.org/uploads/2025/07/Application-Paper-on-the-supervision-of-artificial-intelligence.pdf>
41. Elwyn G., Frosch D., Thomson R., Joseph-Williams N., Lloyd A., Kinnersley P., Cording E., Tomson D., Dodd C., Rollnick S., Edwards A., Barry M. Shared Decision Making: A Model for Clinical Practice. *Journal of General Internal Medicine*. 2012. Vol. 27, iss. 10. P. 1361–1367. doi:10.1007/s11606-012-2077-6.
42. Schein E. H. The Concept of Client from a Process Consultation Perspective: A Guide for Change Agents. *Journal of Organizational Change Management*. 1997. Vol. 10, iss. 3. P. 202–216. doi:10.1108/09534819710171077.
43. Surve P., Patel Y. AI-Based Presentation Generator. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2025. Vol. 12, iss. 3. P. a117–a121. Electronic resource. Available at: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2503014.pdf>
44. Nguyen Z., Annunziata A., Luong V., Dinh S., Le Q., Ha A. H., Le C., Phan H. A., Raghavan S., Nguyen C. *Enhancing Q&A with Domain-Specific Fine-Tuning and Iterative Reasoning: A Comparative Study*. Electronic resource. 2024. Available at: <https://arxiv.org/abs/2404.11792>
45. Khayatbashi S., Sjöland V., Granåker A., Jalali A. AI-Enhanced Business Process Automation: A Case Study in the Insurance Domain Using Object-Centric Process Mining. *BPMDS*. 2025. doi:10.1007/978-3-031-95397-2_1.
46. Namperumal G., Paul D., Soundarapandian R. Deploying LLMs for Insurance Underwriting and Claims Processing: A Comprehensive Guide to Training, Model Validation, and Regulatory Compliance. *Australian Journal of Machine Learning Research & Applications*. 2024. Vol. 4, iss. 1. Electronic resource. Available at: <https://sydneyacademics.com/index.php/ajmlra/article/view/124>
47. Toshmurzaevich Y. O. Developing the Underwriting Process in Life Insurance. *European Journal of Business and Management Research*. 2020. Vol. 5, iss. 6. doi:10.24018/ejbmr.2020.5.6.657.
48. Mourmouris J., Poufinas T. Multi-criteria decision-making methods applied in health-insurance underwriting. *Health Systems*. 2022. Vol. 12, iss. 1. P. 52–84. doi:10.1080/20476965.2022.2085190.
49. Kagan J. *Automated Underwriting: What it is, How it Works*. Electronic resource. 2025. Available at: https://www.investopedia.com/terms/a/automated_underwriting.asp
50. Rosén H. *Automation of Medical Underwriting for Child Insurance : thesis*. Electronic resource. 2020. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1438669/FULLTEXT01.pdf>
51. Jaiswal R. Impact of AI in the General Insurance underwriting factors. *Central European Management Journal*. 2023. Vol. 31, iss. 2. P. 697–705. doi:10.57030/23364890.cemj.31.2.72.
52. Gummadi H. S. B. Explainable AI-Enhanced Underwriting Automation for Personalized Insurance Policy Recommendations. *European Journal of Computer Science and Information Technology*. 2025. Vol. 13, iss. 19. P. 24–40. doi:10.37745/ejcsit.2013/vol13n192440.
53. Filabi A., Duffy S. AI-Enabled Underwriting Brings New Challenges for Life Insurance: Policy and Regulatory Considerations. *Journal of Insurance Regulation*. 2021. Vol. 40, iss. 8. Electronic resource. Available from: <https://content.naic.org/sites/default/files/JIR-ZA-40-08-EL.pdf>
54. Adam F. F., Hikmah Y. Analysis of the Online and Offline Policy Issuance Process of a Life Insurance Company in Indonesia. *Proceedings*. 2022. Vol. 83, iss. 1. P. 14. doi:10.3390/proceedings2022083014.
55. Jeyakumar N. *Analysis of the Digital Direct-to-Customer channel in Insurance : thesis* Electronic resource. 2017. Available from: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/110136/987219263-MIT.pdf?sequence=1>
56. Selvadurai B., Huang K. AI Agents in Insurance. *Agent AI: Theories and Practices*. Cham: Springer Publ., 2025. P. 279–302. doi:10.1007/978-3-031-90026-6_9.
57. Mangalam S., Vranic G. *Use of New Technologies in Regulatory Delivery*. Electronic resource. 2020. Available from: <https://www.enterprise-development.org/wp-content/uploads/DCED-BEWG-Use-of-New-Technologies-in-Regulatory-Delivery.pdf>
58. SAP. *Enterprise Services for Policy Management*. Electronic resource. 2023. Available from: https://help.sap.com/docs/SAP_S4HANA_ON-PREMISE/adb89ff8f4844a528ddc1378963087931ffc63e910fe451cbbae91d333495db8.html?version=2023.003
59. Malali N. *The Basics of Robotic Process Automation in Insurance Claims*. Electronic resource. 2025. Available from: https://www.researchgate.net/publication/385938020_The_Basics_of_Robotic_Process_Automation_in_Insurance_Claims
60. Ghaseminejad A., Sedighadeli S. *Optimising customer retention: An AI-driven personalised pricing approach*. Electronic resource. 2023. Available from: https://www.researchgate.net/publication/377567099_Optimizing_customer_retention_An_AI-driven_personalized_pricing_approach
61. Javed M. K., Wu M., Qadeer T., Manzoor A., Nadeem A. H., Shouse R. C. Role of Online Retailers' Post-sale Services in Building Relationships and Developing Repurchases: A Comparison-Based Analysis Among Male and Female Customers. *Frontiers in Psychology*. 2020. Vol. 11. P. 594132. doi:10.3389/fpsyg.2020.594132.
62. Malali N. *From Data to Decisions: Predictive Machine Learning Models for Customer Retention in Banking*. Electronic resource. 2024. Available from: https://www.researchgate.net/publication/384995568_From_Data_to_Decisions_Predictive_Machine_Learning_Models_for_Customer_Retention_in_Banking

63. Hoang D., Kousi S., Martinez L. F. *Online customer engagement in the post-pandemic scenario: a hybrid thematic analysis of the luxury fashion industry*. *Electronic Commerce Research*. 2023. Vol. 23. P. 1401–1428. doi:10.1007/s10660-022-09635-8.
64. Islam M. A., Hack-Polay D., Rahman M., Hosen M., Hunt A., Shafique S. *The Impact of Customer Experience and Customer Engagement on Behavioral Intentions: Does Competitive Choices Matters?*. *Frontiers in Psychology*. 2022. Vol. 13. Paper 864841. doi:10.3389/fpsyg.2022.864841.
65. Jacob J., Fredrik E. J. T. *Optimizing Customer Retention in Banking Through Advanced AI Technologies*. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2025. Vol. 10, iss. 31s. doi:10.52783/jisem.v10i31s.5061.
66. Singh C., Dash M. K., Sahu R., Bandrana A. K. *Artificial intelligence in customer retention: a bibliometric analysis and future research framework*. *Kybernetes*. 2023. Vol. 53, iss. 2. doi:10.1108/K-02-2023-0245.
67. Fatunmbi T. O. *Predictive Insurance: Data Science Applications in Risk Profiling and Customer Retention*. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. 2025. Vol. 10, iss. 2. P. 300–306. Electronic resource. Available from: <https://philpapers.org/rec/FATPID>
68. Gandhi P., Kowalski J., Shi P., Singer M. *Life insurance: Ready for the digital spotlight*. *Electronic resource*. 2017. Available from: <https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/Life%20insurance%20Ready%20for%20the%20digital%20spotlight/Life-insurance-Ready-for-the-digital-spotlight.pdf>
69. Ma Y. *Data Mining for Enhancing Revenue Generation Capabilities in the Insurance Industry*. *Eurasia Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 6, iss. 7. P. 27–38. doi:10.61784/ejst3053.
70. AbdelAziz N. M., Bekheet M., Salah A., El-Saber N., AbdelMoneim W. T. *A Comprehensive Evaluation of Machine Learning and Deep Learning Models for Churn Prediction*. *Information*. 2025. Vol. 16, iss. 7. P. 537. doi:10.3390/info16070537.
71. Imani M., Joudaki M., Beikmohammadi A., Arabnia H. R. *Customer Churn Prediction: A Systematic Review of Recent Advances, Trends, and Challenges in Machine Learning and Deep Learning*. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2025. Vol. 7, iss. 3. P. 105. doi:10.3390/make7030105.
72. Shostak I., Matyushenko I., Romanenkov Y., Danova M., Kuznetsova Y. *Computer Support for Decision-Making on Defining the Strategy of Green IT Development at the State Level*. *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications* / V. Kharchenko, Yu. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.). Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 533–559. doi:10.1007/978-3-030-00253-4_23.

Надійшла (received) 14.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Будюков Євгеній Олегович (Budiukov Yevhenii) – аспірант кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Yevhenii.Budiukov@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9225-019X>.

Лобач Олена Володимирівна (Lobach Olena) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна; e-mail: e.v.lobach@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7494-9997>.

О. М. КОНДРАТОВ, В. П. СЕВЕРИН, Д. К. ПОПАЗОВ, С. М. ЛЮБАРСЬКИЙ, О. М. НІКУЛІНА

ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЇ, ОПТИМІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

У статті представлено комплексний підхід до створення інтелектуальних систем управління динамічними об'єктами на основі сучасних методів обчислювального інтелекту. В умовах обробки високорозмірних, нестабільних та слабоформалізованих даних у реальному часі традиційні методи моделювання є недостатньо ефективними, що особливо критично для промислових і транспортних систем, де помилки управління можуть призводити до значних втрат. Дослідження спрямоване на розробку адаптивних замкнутих контурів управління, які поєднують ідентифікацію поточного стану, прогнозування та вибір оптимального керуючого впливу в умовах невизначеності. Запропонована архітектура інтегрує модулі збору й обробки даних, ідентифікації параметрів, оптимізації та підтримки прийняття рішень. Основою моделювання є гібридні алгоритми машинного навчання, зокрема поєднання згорткових нейронних мереж і трансформерних архітектур, а також метагевристичних методів. Передбачено механізми онлайн-донавчання з мінімальною зміною ваг та використання універсальної пам'яті трансформера для адаптації до змін середовища. Дистанційна ідентифікація параметрів реалізується шляхом аналізу мультимодальних потоків даних, включаючи відео та сенсорні сигнали, із застосуванням методів виявлення об'єктів, сегментації сцени та аналізу оптичного потоку. Система підтримки рішень має дворівневу структуру: прецедентно-правильовий рівень для оперативної обробки типових ситуацій і оптимізаційний рівень на основі багатокритеріального аналізу за Парето. Використання пояснювального AI забезпечує прозорість рішень, а адаптація моделей здійснюється із застосуванням навчання з підкріпленням. Результати підтверджують ефективність підходу в промислових, транспортних та міських системах і визначають перспективи подальшого розвитку з урахуванням мультиагентних та нейроморфних технологій.

Ключові слова: штучні нейронні мережі, інтелектуальна технологія, архітектура застосунків, нейронна мережа, модель, інформаційна система, програмне забезпечення, машинне навчання, технологія.

O. KONDRATOV, V. SEVERYN, D. POPAZOV, S. LIUBARSKYI, O. NIKULINA

APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE FOR MODELING, IDENTIFICATION, OPTIMIZATION OF CONTROL INFORMATION SYSTEMS AND DECISION SUPPORT

The article presents a comprehensive approach to creating intelligent control systems for dynamic objects based on advanced computational intelligence methods. In the context of processing high-dimensional, unstable, and poorly formalized data in real-time, traditional modeling methods are insufficiently effective, which is especially critical for industrial and transport systems where control errors can lead to significant losses. The research is aimed at developing adaptive closed-loop control contours that combine current state identification, prediction, and the selection of optimal control influence under uncertainty. The proposed architecture integrates modules for data collection and processing, parameter identification, optimization, and decision support. The modeling core relies on hybrid machine learning algorithms, specifically a combination of Convolutional Neural Networks and Transformer architectures, as well as metaheuristic methods. Mechanisms for online re-training with minimal weight change and the use of Universal Transformer Memory are provided for adaptation to environmental changes. Remote parameter identification is realized by analyzing multimodal data streams, including video and sensor signals, using methods of object detection, scene segmentation, and optical flow analysis. The Decision Support System has a two-level structure: a rule-based level for operational processing of typical situations and an optimization level based on multi-criteria Pareto analysis. The use of Explainable AI ensures the transparency of decisions, and model adaptation is carried out using Reinforcement Learning. The results confirm the effectiveness of the approach in industrial, transport, and urban systems and outline the prospects for further development by incorporating multi-agent and neuromorphic technologies.

Keywords: artificial neural networks, intelligent technologies, applications architecture, neural network, model, information system, software, machine learning, technology.

Вступ. У сучасному інформаційному суспільстві, яке характеризується швидкою цифровізацією та зростанням складності динамічних процесів, постає актуальна науково-практична проблема: невідповідність традиційних методів моделювання, оптимізації та прийняття рішень новим викликам. Ці виклики пов'язані з необхідністю аналізувати високорозмірні, нестабільні та слабоформалізовані дані (такі як відеопотоки, сенсорні показники, просторово-часові сигнали) в режимі реального часу.

Вказана проблема має безпосередній зв'язок із низкою важливих завдань. На практичному рівні – це завдання підвищення ефективності та надійності управління складними системами (промисловими, транспортними, енергетичними), де запізніле чи неточне рішення може призвести до значних матеріальних втрат або аварійних ситуацій. На науковому рівні – це завдання розробки нових методологій, здатних не лише обробляти дані, але й

створювати замкнуті цикли адаптивного управління, що включають ідентифікацію стану системи, його прогнозування та вибір оптимального керуючого впливу в умовах невизначеності.

Саме тому все більшого поширення набуває застосування методів обчислювального інтелекту (ОІ), які поєднують у собі гнучкість нейронних мереж, здатність до навчання та самоорганізації, а також можливість побудови систем прийняття рішень в умовах невизначеності.

Водночас важливо не лише застосовувати окремі ML/AI-алгоритми, а будувати повноцінні інтелектуальні системи, що інтегрують в собі засоби моделювання, ідентифікації, оптимізації та прийняття рішень. Це дозволяє створювати керуючі комплекси нового покоління, здатні адаптуватися до змін у середовищі та підвищувати ефективність процесів у промислових, транспортних, енергетичних та інших системах.

© О. М. Кондратов, В. П. Северин, Д. К. Попазов, С. М. Любарський, О. М. Нікуліна, 2025

Сучасні розробки у сфері обчислювального інтелекту, зокрема для управління динамічними системами, базуються на значному науковому фундаменті, що підтверджується аналізом ключових джерел інформації.

Розглянута теоретико-методологічна база обчислювальних методів для моделювання, прогнозу та оптимізації [1]. Проведено аналіз інформаційних технологій для дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів [2]. Систематизовано сучасні підходи до задач моделювання та оптимізації. Запропоновано використання метаевристик (PSO, GA) для складних систем [1]. Розглянуті методи дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів на основі трансформерів [2-5]. Набули значного розвитку технології обробки даних на основі YOLO-архітектур [6-8], мультіагентних систем [9], FlowNet [10, 11]. Проведені дослідження доводять ефективність використання гібридних моделей (DETR+YOLO) для виявлення динамічних об'єктів [6], синхронізації даних з різних джерел [9], оптичного потоку для аналізу руху динамічних об'єктів (точність вище 90%) [11, 12]. Перспективним напрямом є розробки квантових алгоритмів з прискоренням обчислень за рахунок Liger Kernel та універсальних трансформерів [13-15]. В інтелектуальних системах управління для прийняття оптимальних рішень зростає роль Explainable AI [16] та мультимодальної обробки даних (відео+сенсори) [17].

Таким чином, розробка моделей і архітектур обчислювального інтелекту, що дозволяють здійснювати повний цикл управління динамічними системами – від збору даних до реалізації адаптивного управління, є актуальним науковим і практичним завданням, вирішення якого має міждисциплінарне значення.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка моделей і архітектур обчислювального інтелекту для моделювання, ідентифікації, оптимізації інформаційних управляючих систем та підтримки прийняття рішень.

Для досягнення цієї мети визначено ряд актуальних наукових задач:

- розробити архітектуру інтелектуальної системи управління на основі гібридних ML/AI-моделей, здатних до адаптації в реальному часі;
- створити інформаційну технологію для автоматизованої ідентифікації параметрів динамічних об'єктів за відеопотоком, оптичним потоком та сенсорними даними;
- інтегрувати механізми оптимізації (метаевристики, підкріплювальне навчання) у модулі керування для підвищення ефективності рішень;
- надати рекомендації з побудови системи прогнозування та підтримки прийняття рішень на базі explainable AI для забезпечення прозорості та обґрунтованості рішень в умовах невизначеності.

Значним викликом є забезпечення обчислювальної ефективності таких систем в умовах потокової обробки даних у реальному часі.

Таким чином, інтеграція обчислювального інтелекту в сучасні технології відкриває нові горизонти для покращення управління, прогнозування та оптимізації процесів у багатьох сферах.

Аналіз використаних літературних джерел.

Огляд літературних джерел охоплює широкий спектр напрямів, що стосуються моделювання, ідентифікації та оптимізації систем з використанням обчислювального інтелекту. Робота [1] надає методологічні основи для побудови інтелектуальних систем, а джерело [2] описує практичні підходи до дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів. Значну увагу приділено архітектурам YOLO [8] та їх сучасним модифікаціям YOLOv11 [7] і DEYO [6], що забезпечують високу швидкість і точність виявлення об'єктів.

Дослідження [3, 5, 9, 12] стали підґрунтям для побудови систем підтримки прийняття рішень у реальному часі, а роботи [4, 10, 11] розкривають методи аналізу оптичного потоку та біосигналів, зокрема EMG. Ефективне використання обчислювальних ресурсів, розглянуте у [13], є важливим для розробки масштабованих і оптимізованих моделей штучного інтелекту.

Досягнення у сфері трансформерів та stereo matching, описані в [14, 15], створюють основу для високоточних адаптивних моделей. Статті [16, 17, 18], що містять авторські підходи до ідентифікації та підтримки рішень, підтверджують наукову обґрунтованість та практичну цінність запропонованих рішень. Аналіз підтверджує доцільність подальшої розробки нових інтелектуальних систем.

Інтелектуальна система управління. На рис. 1 представлена загальна структура інтелектуальної системи управління динамічними системами, де основна увага зосереджена на зборі, попередній обробці даних, ідентифікації структури системи, оптимізації та реалізації інтелектуальних алгоритмів (ML/AI/NN/Fuzzy) [1, 16]. Ця схема інтегрує модулі для повного циклу обробки даних, аналізу та прийняття рішень. Модуль оптимізації відіграє ключову роль, поєднуючи методи еволюційного пошуку, підкріплювального навчання та метаевристик (PSO, GA тощо). Нижче наведено детальний опис кожного компонента

Модуль збору даних об'єднує джерела даних, такі як відеопотоки (наприклад, з камер спостереження) [3, 9], сенсори (датчики руху, акселерометри, GPS тощо), зовнішні системи (метеодатчики, бази даних). Функції цього модуля полягають в реалізації інтерфейсів для отримання даних у реальному часі, а також в попередній фільтрації шуму та артефактів.

Модуль попередньої обробки включає основні етапи: нормалізація, тобто приведення даних до єдиного масштабу (наприклад, стандартизація відеокadrів); сегментація як виділення областей інтересу (наприклад, об'єктів у кадрі); оптичний потік (FlowNet) з аналізом руху об'єктів між кадрами. У цьому модулі використовуються інструменти –

бібліотеки OpenCV і TensorFlow для обробки зображень.

Модуль ідентифікації структури та параметрів використовує моделі CNN (згорткові мережі) для виділення ознак об'єктів (наприклад, YOLO-NAS [8]) і трансформери для аналізу довгострокових залежностей у послідовностях даних. Вихідні дані цього модуля – параметри динамічних об'єктів (координати, швидкість, прискорення) та стан системи (наприклад, "аварійний режим").

Модуль оптимізації включає такі методи як метаевристики PSO (оптимізація роєм частинок), генетичні алгоритми (GA), підкріплювальне навчання (RL) для адаптації стратегій керування. Ціль оптимізації – мінімізація енерговитрат, часу реакції або оптимізація інших цільових функцій.

Модуль прийняття рішень реалізує наступні підходи: Rule-based системи з готовими правилами для стандартних сценаріїв і гібридні моделі ML + Explainable AI з поясненнями рекомендацій (наприклад, LIME/SHAP [16]). Результатом цього

модуля є команди для виконавчих пристроїв (наприклад, зміна траєкторії дрона).

Зворотний зв'язок та адаптація включають механізми моніторингу результатів з порівнянням очікуваних і фактичних показників, оновлення моделей з періодичним донавчанням мереж на нових даних, інтеграції з хмарними платформами (наприклад, AWS/GCP) для зберігання та аналізу історії дій.

Стрілки на рис. 1 показують потік даних між модулями.

Запропонована архітектура забезпечує адаптивність з можливістю "навчання" на нових даних, масштабованість з обробкою великих обсягів інформації завдяки оптимізованим алгоритмам, надійність з резервуванням критичних модулів (наприклад, дублювання сенсорів).

Циклічне навчання та механізм зворотного зв'язку забезпечують адаптацію системи до змін середовища, що підвищує її надійність і точність.

Ця схема є основою для побудови реальних систем у промисловості, транспорті та Smart City.

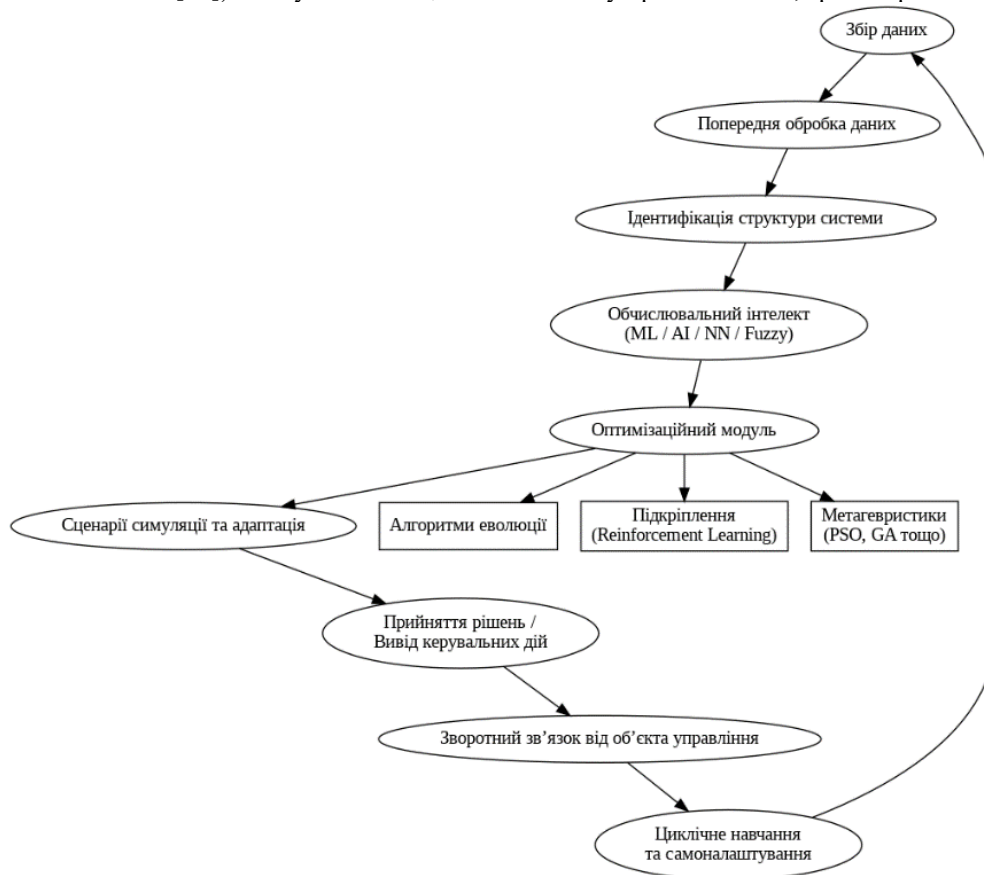


Рис. 1. Загальна структура інтелектуальної системи управління

Обробка сигналів та ідентифікація об'єктів. На рис. 2 представлено етапи аналізу вхідних даних з відео, сенсорів та зображень, які проходять через модуль попередньої обробки: оптичний потік (FlowNet), EMG Pose (emg2pose), аналіз сцени (Stereo Anywhere). Далі відбувається виділення ознак за допомогою CNN, трансформерів та їх варіацій із пам'яттю, а також ідентифікація параметрів об'єкта: положення, швидкості, траєкторії тощо.

На рис. 2 детально представлено етапи обробки мультимодальних даних (відео, сенсори, зображення) для ідентифікації параметрів динамічних об'єктів. Нижче наведено структурований опис кожної складової.

Вхідні дані включають джерела сигналів: відеопотік (наприклад, RGB/інфрачервоні камери); сенсорні дані (IMU-датчики, лідари, радары); статичні зображення (аерофотозйомка, супутникові знімки). Формат даних для відео – послідовність кадрів у

форматі H.264/RAW, а для сенсорів – часові ряди з частотою.

Попередня обробка даних може виконуватись модулями: оптичний потік (FlowNet) за алгоритмом FlowNet 2.0 (архітектура CNN) з функцією обчислення векторів руху між кадрами та виходом у вигляді tensor $[H \times W \times 2]$ з компонентами (Δx , Δy); EMG Pose (emg2pose) з входом у вигляді сигналів електроміографії (8-канальні); Stereo Anywhere з особливістю zero-shot стереозіставлення, входом пари зображень з різною базою та виходом у вигляді глибинної карти з роздільною здатністю 640×480 .

Виділення ознак виконується за архітектурами: згорткові мережі (CNN) з моделлю YOLO-NAS (попередньо навчена на COCO) та шарами CSPDarknet + SPPF + PANet і виходом bounding boxes та confidence scores; трансформери з пам'яттю модифікації Evolved Transformer Memory з особливістю зберігання контексту з застосуванням для прогнозування траєкторій.

Метод визначення ідентифікації параметрів динамічних об'єктів надано в табл. 1, де для таких

параметрів як положення, швидкість, прискорення, орієнтація наведені методи визначення цих параметрів та абсолютна похибка.

Вихідні інтерфейси включають формати виведення у вигляді JSON-стрічки з полями:

```
json
{
  "object_id": 102,
  "position": [x,y,z],
  "velocity": 3.2,
  "trajectory": [[x1,y1], [x2,y2]]
}
```

Системи-споживачі інформації – хмарні платформи (AWS IoT Core) та локальні системи керування (ROS 2 Node).

Ключові технології включають апаратне прискорення на основі NVIDIA Jetson для Edge-обчислень та TensorRT для оптимізації інференсу, програмний стек з бібліотеками OpenCV та PyTorch і протоколами MQTT для передачі даних.

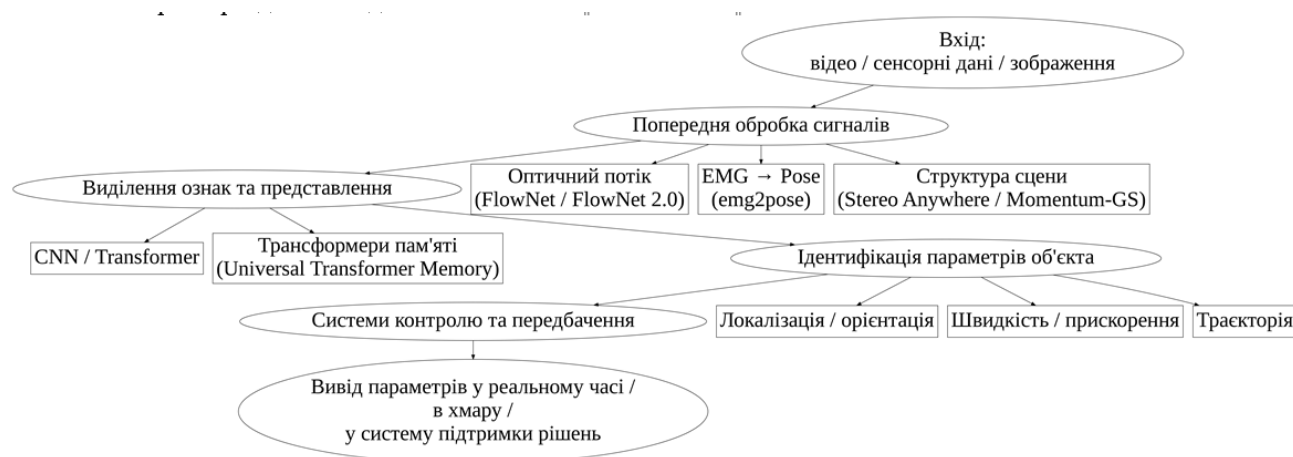


Рис. 2. Аналіз, прогнозування, прийняття рішень

Таблиця 1 – Метод визначення ідентифікації параметрів

Параметр	Метод визначення
Положення	Stereo Triangulation
Швидкість	Optical Flow + Kalman Filter
Прискорення	IMU Sensor Fusion
Орієнтація	Quaternion from EMG

Приклад роботи системи для дрона: камера фіксує перешкоду (дерево), FlowNet визначає відносну швидкість, YOLO-NAS класифікує об'єкт, модуль оптимізації генерує нову траєкторію, рішення передається до контролера двигунів.

Така схема демонструє високу ефективність для задач управління автономними транспортними засобами та промисловими моніторинговими системами, а також виконувати AR/VR трекінг у реальному часі.

Результати передаються в хмарні системи або системи підтримки рішень, забезпечуючи високу швидкість обробки та точність ідентифікації.

Для подальшого вдосконалення передбачається інтеграція квантових сенсорів та нейроморфних обчислювальних модулів.

Аналіз, прогнозування та прийняття рішень.

На рис. 3 представлено архітектуру системи аналізу, прогнозування та оптимізації. Вхідні дані агрегуються та контекстуалізуються з урахуванням великих відеопотоків, мультикамерного моделювання та оптимізації обчислювальних ресурсів (наприклад, Liger Kernel). У модулі прогнозування застосовуються сучасні моделі: DETR+YOLO, Boosting, YOLO-NAS.

Рекомендації формуються як на основі правил, так і моделей машинного навчання, доповнюються поясненнями (Explainable AI), оптимізуються з урахуванням цільових функцій, обмежень і компромісів (Pareto). Усі дії системи моніторяться і відбувається адаптація моделей на основі зворотного зв'язку.

На рис. 3 представлено комплексну багаторівневу систему аналізу, прогнозування та оптимізації, яка інтегрує сучасні методи AI для обробки великих даних,

прогнозування та генерації керуючих рішень. Надано детальний опис структури:

На вхідному рівні даних використовуються джерела інформації: мультикамерні відеопотоки (4K@60fps, HDR), IoT-сенсори (температура, вібрація, тиск), геопросторові дані (LiDAR, GPS/ГЛОНАСС), корпоративні бази даних (SQL/NoSQL). Технології агрегації можуть бути реалізовані на базі Liger Kernel з підтримкою tensor-форматів (TFRecord, Arrow) та з автоматичним балансуванням навантаження.

Модуль попереднього аналізу включає підсистеми контекстуалізації даних з просторово-

часовим вирівнювання потоків і нормалізацією часових міток (PTP v2), оптимізації ресурсів з динамічним масштабуванням обчислень та пріоритизацією задач (QoS-рівні). Використані алгоритми адаптивного субдискретизування відео (Bilinear++) та штучного шуму для анонімізації (GDPR-сумісний).

Ядро прогнозування складається з моделей виявлення об'єктів, сегментації сцени та прогнозування станів. Застосування моделей аналізу сценаріїв та прогнозування наведені в табл. 2.

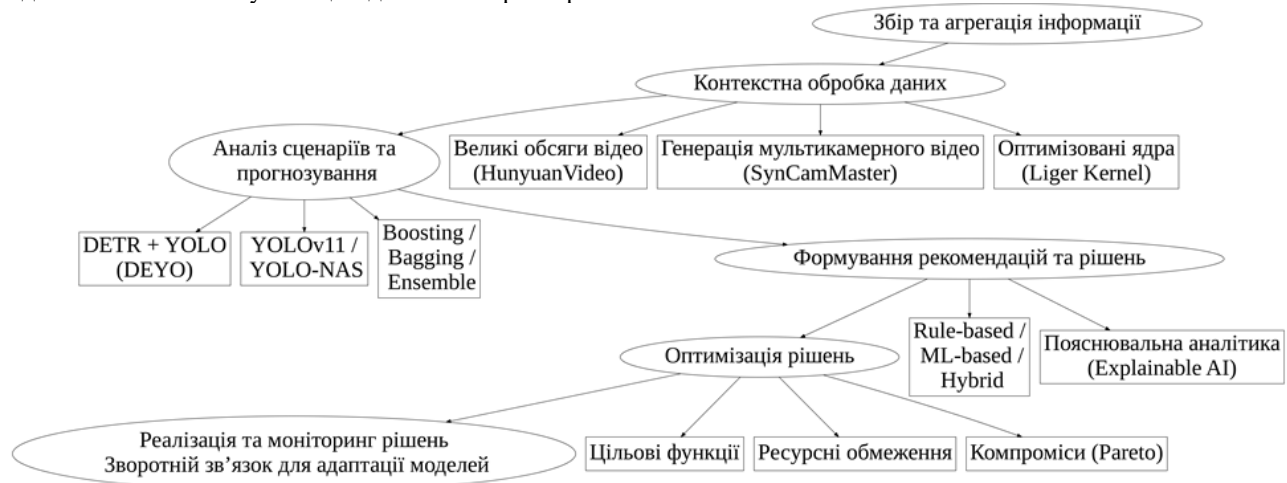


Рис. 3. Аналіз, прогнозування, прийняття рішень

Таблиця 2 – Застосування моделей аналізу сценаріїв та прогнозування

Модель	Застосування
DETR+YOLO	Виявлення об'єктів
YOLO-NAS	Сегментація сцени
Градiєнтний бустинг	Прогнозування станів

Особливості реалізації схеми прогнозування полягають в використанні гібридної архітектури (CNN + Transformer), механізму online-донавчання (Δ -ваги < 0.001), Evolved Universal Transformer Memory.

Система підтримки рішень має два рівні обробки – Rule-based рівень та оптимізаційний рівень. Rule-based рівень включає прецедентні правила (Drools Engine), використовує Explainable AI (XAI) з інтерпретацією за допомогою SHAP/LIME [16] і генерацією звітів у форматі PMML. Оптимізаційний рівень використовує метод Парето для багатокритеріального аналізу та може бути реалізований на CUDA [1, 9].

Вихідні інтерфейси мають формати виведення REST API (Swagger-документація), стрімінг наприклад через Apache Kafka, візуалізацію у Power BI/Tableau. Керуючі впливи: PID-регулятори (промислові системи), набори рекомендацій (для операторів), екстрені alerts (SMS/месенджери).

Механізми моніторингу рішень включають компоненти Health Check System з контролем затримок (SLA) і діагностикою дрейфу даних (KS-тест) та

адаптаційний контур з корекцією моделей через RL (TD3 алгоритм) та оновленням кожні 24 години.

Така інформаційна технологія може мати широке галузеве застосування: розумні міста з оптимізацією світлофорів і прогнозуванням пікового навантаження; промисловість з предиктивним обслуговуванням і динамічним плануванням виробництва; транспорт з маршрутизацією в аеропортах та автономними складськими системами. Перспективи розвитку полягають в інтеграції квантових sampling-алгоритмів, використанні нейроморфних чипів для обробки відео та в розподіленому навчанні на federated-архітектурі. Ця схема є універсальним каркасом для побудови AI-систем з підтримкою складних операційних середовищ.

Висновки. Запропоновані схеми дозволяють наочно представити комплексний підхід до створення інтелектуальних систем: від збору даних до реалізації оптимізованих рішень. Взаємодія блоків штучного інтелекту, оптимізації та систем зворотного зв'язку забезпечує гнучкість і адаптивність в управлінні складними об'єктами.

У роботі запропоновано підхід до створення інтелектуальних систем управління динамічними об'єктами з використанням методів обчислювального інтелекту. Отримано такі основні результати:

Створено архітектуру інтелектуальної системи управління, яка поєднує модулі збору даних, попередньої обробки, ідентифікації параметрів, оптимізації та прийняття рішень. Основу системи

складають адаптивні алгоритми машинного навчання, включаючи гібридні CNN/Transformer-архітектури з пам'яттю.

Розроблено інформаційну технологію дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів, яка реалізує обробку відеоданих за допомогою методів оптичного потоку (FlowNet), EMG-аналізу (emg2pose) і сенового розпізнавання (Stereo Anywhere), з подальшим виділенням ознак і визначенням просторово-часових характеристик об'єктів.

Інтегровано сучасні методи оптимізації в модулі керування: зокрема, еволюційні алгоритми (PSO, GA), навчання з підкріпленням та метаевристики. Це забезпечило адаптивність управління до змін середовища та підвищення ефективності прийняття рішень.

Систему прогнозування та підтримки прийняття рішень доцільно реалізувати з використанням ансамблів моделей (Boosting, YOLO-NAS), а також rule-based і hybrid-підходами з пояснюваними механізмами (Explainable AI). Вона буде забезпечувати обґрунтованість рішень, автоматичну адаптацію та оптимізацію під цільові функції з урахуванням обмежень і компромісів.

Таким чином, запропонована система демонструє комплексний підхід до створення гнучких і адаптивних засобів керування складними об'єктами. Вона може бути основою для подальшої інтеграції з мультиагентними архітектурами, квантовими алгоритмами, а також використання в критично важливих сферах, що вимагають високої точності, надійності та пояснюваності. Запропонована архітектура інтегрує перевірені методи та інновації, що забезпечує її наукову новизну та практичну цінність. У майбутньому можливе розширення таких систем через інтеграцію з квантовими алгоритмами, мультиагентними платформами, а також впровадження explainable AI у критично важливих сферах.

Список літератури

1. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. *Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization – A Review*. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17143521> (дата звертання: 15.05.2025)
2. Нікуліна О. М., Северин В. П., Кондратов О. М., Рекова Н. Ю. Аналіз інформаційних технологій для дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків. НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 110–115.
3. HunyuanVideo: A Systematic Framework For Large Video. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.03603> (дата звертання: 15.05.2025)
4. emg2pose: A Large and Diverse Benchmark for Surface Electromyographic Hand Pose Estimation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02725> (дата звертання: 15.05.2025)
5. StableAnimator: High-Quality Identity-Preserving Human Image Animation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17697> (дата звертання: 15.05.2025)
6. DEYO: DETR with YOLO for End-to-End Object Detection. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.16370> (дата звертання: 15.05.2025)

7. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725> (дата звертання: 15.05.2025)
8. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17143521> (дата звертання: 15.05.2025)
9. SynCamMaster: Synchronizing Multi-Camera Video Generation from Diverse Viewpoints. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07760> (дата звертання: 15.05.2025)
10. FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.06852> (дата звертання: 15.05.2025)
11. FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.01925> (дата звертання: 15.05.2025)
12. Momentum-GS: Momentum Gaussian Self-Distillation for High-Quality Large Scene Reconstruction. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04887> (дата звертання: 15.05.2025)
13. Liger Kernel: Efficient Triton Kernels for LLM Training. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10989> (дата звертання: 15.05.2025)
14. Stereo Anywhere: Robust Zero-Shot Deep Stereo Matching Even Where Either Stereo or Mono Fail. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04472> (дата звертання: 15.05.2025)
15. An Evolved Universal Transformer Memory. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13166> (дата звертання: 15.05.2025)
16. Кондратов О. М., Северин В. П., Попазов Д. К., Любарський С. М., Нікуліна О. М. Аналіз методів обчислювального інтелекту для моделювання, ідентифікації, оптимізації систем та підтримки прийняття рішень. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків. НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (9). С. 35–44.
17. Нікуліна О. М., Северин В. П., Кондратов О. М., Ольховий О. М. Моделі дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів з використанням трансформерів виявлення та оптичного потоку. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків. НТУ «ХПІ», 2024. № 1 (11). С. 52–57.
18. Копп О. М., Нестеренко І. С. Модель вибору інструментів штучного інтелекту для підтримки процесів розробки програмного забезпечення. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків. НТУ «ХПІ», 2024. № 2 (9). С. 45–49.

References (transliterated)

1. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. *Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization—A Review*. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma17143521> (accessed 15.05.2025)
2. Nikulina O. M., Severyn V. P., Kondratov O. M., Reкова N. Y. Analiz informatsiynykh tekhnolohii dlia dystantsiinoi identyfikatsii dynamichnykh ob'ektiv. [Analysis of information technologies for remote identification of dynamic objects]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., no. 1 (9), pp. 110–115.
3. HunyuanVideo: A Systematic Framework For Large Video. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.03603> (accessed 15.05.2025)
4. emg2pose: A Large and Diverse Benchmark for Surface Electromyographic Hand Pose Estimation. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02725> (accessed 15.05.2025)
5. StableAnimator: High-Quality Identity-Preserving Human Image Animation. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17697> (accessed 15.05.2025)
6. DEYO: DETR with YOLO for End-to-End Object Detection. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.16370> (accessed 15.05.2025)

7. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725> (accessed 15.05.2025)
8. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. Available at: <https://doi.org/10.3390/make5040083> (accessed 15.05.2025)
9. SynCamMaster: Synchronizing Multi-Camera Video Generation from Diverse Viewpoints. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07760> (accessed 15.05.2025)
10. FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.06852> (accessed 15.05.2025)
11. FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.01925> (accessed 15.05.2025)
12. Momentum-GS: Momentum Gaussian Self-Distillation for High-Quality Large Scene Reconstruction. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04887> (accessed 15.05.2025)
13. Liger Kernel: Efficient Triton Kernels for LLM Training. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10989> (accessed 15.05.2025)
14. Stereo Anywhere: Robust Zero-Shot Deep Stereo Matching Even Where Either Stereo or Mono Fail. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04472> (accessed 15.05.2025)
15. An Evolved Universal Transformer Memory. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13166> (accessed 15.05.2025)
16. Kondratov O. M., Severyn V. P., Popazov D. K., Liubarskyi S. M., Nikulina O. M. Analiz metodiv obchysluvalnoho intelektu dlia modeliuvannia, identyfikatsii, optymizatsii system ta pidtrymky pryiniattia rishen [Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Strategic management portfolio program and project management]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., no. 2 (9), pp. 35-44.
17. Nikulina O. M., Severyn V. P., Kondratov O. M., Olhovoy O. M. Modeli dystantsiinoi identyfikatsii parametriv dynamichnykh ob'ektiv z vykorystanniam transformeriv vyavleniia ta optychnoho potoku. [Models of remote identification of parameters of dynamic objects using detection transformers and optical flow]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., no. 1 (11), pp. 52-57.
18. Kopp A. M., Nesterenko I. S. Model vyboru instrumentiv shtuchnoho intelektu dlia pidtrymky protsesiv rozrobky prohramnoho zabezpechennia. [A model for selecting artificial intelligence tools to support software development processes]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Strategic management portfolio program and project management]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., no. 2 (9), pp. 45-49.

Надійшла (received) 15.09.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Кондратов Олексій Михайлович (Kondratov Oleksii Mikhailovich) – аспірант, старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; старший викладач кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень ТОВ «ТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: kondratovolexiy@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>.

Северин Валерій Петрович (Severyn Valerii Petrovych) – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: valerii.severyn@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>.

Попазов Дмитро Костянтинівич (Popazov Dmytro Kostiantynovych) – аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dmytro.popazov@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4717-0995>.

Любарський Сергій Михайлович (Liubarskyi Serhii Mikhailovich) – аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: serhii.liubarskyi@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5454-3019>.

Нікуліна Олена Миколаївна (Nikulina Olena Mykolaivna) – д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; професор кафедри цифрових технологій та проектно-аналітичних рішень ТОВ «ТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна; e-mail: elniknik02@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>.

A. KOPP, R. DASHKIVSKYI**TOWARDS HYBRID CLOUD INFRASTRUCTURE QUALITY ASSESSMENT MODEL**

The paper presents a hybrid model for the cloud infrastructure quality assessment, which combines subjective expert assessments with objective results of statistical analysis. The proposed model, called Hybrid Expert-derived with Entropy-based Weighted Sum Model (HEE-WSM), combines the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine weights based on expert assessments and the entropy-based approach to calculate weights using real data. The proposed HEE-WSM model is a novel approach that takes into account both expert judgments and cloud environment monitoring data. Eight criteria (such as availability, reliability, latency, scalability, performance efficiency, cost, security compliance, and support responsiveness) based on the international standards NIST SP 800-145 and ISO/IEC 25010 are proposed for the cloud infrastructure quality assessment. These criteria are divided into "benefit" and "cost" criteria, which is necessary to ensure normalization and proper comparison of different quality metrics. A hybrid mechanism for determining weighting coefficients allows balancing the weighting coefficients determined on the basis of AHP and the entropy approach using an adjustable coefficient that provides flexibility depending on decision-making needs. Thus, the flexibility of the proposed model is ensured by the ability to adjust the influence of subjective and objective weights of criteria. The final quality assessment is performed using the Weighted Sum Model that aggregates normalized quality metric scores for each alternative. To demonstrate the robustness of the proposed approach, ten leading cloud providers were analyzed in this study, including Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform (GCP), Alibaba Cloud, and several others. The obtained results demonstrated that the proposed model allows for effective evaluation of cloud services, with GCP receiving the highest total quality score. The proposed approach can be considered an adaptive, transparent, and useful tool for implementation in decision support systems for cloud infrastructure management. The proposed model can be applied in organizations and enterprises for the informed selection of cloud service providers. Future research includes the integration of real-time data monitoring and the application of machine learning methods for automatic adjustment of quality criteria weights.

Keywords: cloud infrastructure quality assessment, expert judgment, entropy-based assessment, hybrid assessment model, quality criteria, cloud service quality metrics, decision making.

А. М. КОПП, Р. Б. ДАШКІВСЬКИЙ**ПРО ГІБРИДНУ МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ХМАРНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

У статті представлено гібридну модель оцінювання якості хмарної інфраструктури, яка поєднує суб'єктивні експертні оцінки з об'єктивними результатами статистичного аналізу. Запропонована модель, яка отримала назву Hybrid Expert-derived with Entropy-based Weighted Sum Model (HEE-WSM), поєднує метод аналізу ієрархії (MAI) для визначення ваг на основі оцінок експертів та ентропійний підхід для розрахунку ваг на основі реальних даних. Запропонована модель HEE-WSM є новим підходом, який враховує як судження експертів, так і дані моніторингу хмарного середовища. Для оцінювання якості хмарної інфраструктури пропонується використовувати вісім критеріїв (таких, як доступність, надійність, затримка, масштабованість, ефективність роботи, вартість, відповідність вимогам безпеки та оперативність підтримки), заснованих на міжнародних стандартах NIST SP 800-145 та ISO/IEC 25010. За типами дані критеріїв поділяються на «виграшні» та «витратні» критерії, що необхідно для забезпечення нормалізації та належного порівняння різних метрик якості. Гібридний механізм визначення вагових коефіцієнтів дозволяє збалансувати вагові коефіцієнти, визначені на основі MAI та ентропійного підходу, за допомогою регульованого коефіцієнта, який забезпечує гнучкість залежно від потреб у прийнятті рішень. Таким чином, гнучкість запропонованої моделі забезпечується можливістю регулювати вплив суб'єктивних та об'єктивних ваг критеріїв. Остаточне оцінювання якості проводиться за допомогою моделі зваженої суми, яка агрегує нормалізовані показники метрик якості для кожної альтернативи. Для демонстрації працездатності запропонованого підходу, в роботі було проаналізовано десять провідних хмарних провайдерів, включаючи Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform (GCP), Alibaba Cloud та деякі інші. Отримані результати продемонстрували, що запропонована модель дозволяє ефективно оцінювати хмарні сервіси, причому GCP отримав найвищу інтегровану оцінку. Запропонований підхід можна вважати адаптивним, прозорим і корисним інструментом для впровадження в системи підтримки прийняття рішень для управління хмарною інфраструктурою. Запропонована модель може бути застосована в організаціях і підприємствах для обґрунтованого вибору постачальників хмарних послуг. Майбутні дослідження включають інтеграцію моніторингу даних у реальному часі та застосування методів машинного навчання для автоматичного коригування ваг критеріїв якості.

Ключові слова: оцінювання якості хмарної інфраструктури, експертне оцінювання, оцінювання на основі ентропії, гібридна модель оцінювання, критерії якості, метрики якості хмарних послуг, прийняття рішень.

Introduction. Cloud computing plays a key role in modern information systems. It provides flexibility, scalability, and reduced IT infrastructure costs. However, assessing the quality of cloud infrastructure remains a challenging task. Cloud services are provided by various vendors. Each of them offers different levels of availability, performance, security, and support. Therefore, it is important to have a formalized quality assessment model. Such a model should take into account several criteria and their relative weights.

One popular approach is the Weighted Sum Model (WSM). It allows different quality indicators to be combined into a single integrated index. This approach has been used in a number of studies in recent years. For example, Basu et al. proposed the use of a fuzzy weighted

sum for selecting a cloud service provider based on Service Level Agreements (SLA) [1]. Xiao et al. applied a similar model to balance tasks between data centers and edge nodes. They combined latency and energy consumption as weighting criteria [2]. García-Ayllón et al. evaluated infrastructure based on geospatial data processed in a cloud environment [3].

Thus, the problem of assessing the quality of cloud infrastructure is relevant. It requires a systematic approach that takes into account the multi-criteria nature and diversity of technical indicators.

Related work. Assessing the quality of cloud services requires the use of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods. Such methods allow for the

consideration of several parameters that influence the choice of a cloud service provider.

The paper of Hosseinzadeh et al. [4] presents a comparative analysis of MCDM methods such as WSM, Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) [5], and Analytic Hierarchy Process (AHP) [6]. The authors proposed the Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) method, which is well suited for dynamic cloud environments due to its flexible combination of weighted sums and products.

Mostafa in [7] developed the Best-Only Method (BOM) within the framework of MCDM. This method allows to focus only on the most significant criteria, which reduces the influence of secondary indicators and increases the accuracy of the selection.

The study of Nadeem [8] presents a hierarchical MCDM model that takes into account 15 qualitative factors. The proposed model forms a unified ranking system for Infrastructure as a Service (IaaS) providers based on service quality and usability indicators.

Another approach is presented in the paper of Gireesha et al. [9], where intuitive fuzzy logic was combined with the WASPAS method to provide the Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets-Weighted Aggregate Sum and Product Assessment (IIVIFS-WASPAS) method. This approach improves the quality of cloud provider ranking, especially in conditions of data uncertainty.

Tomar et al. [10] proposed a hybrid model that combines objective weights (e.g., through entropy) with subjective expert assessments. This allows the system to be adapted to specific user requirements.

In the work of Saha et al. [11], the Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method was used together with the entropy approach to calculate weight coefficients. The model allows determining the relationships between criteria and ranking cloud service providers based on a comprehensive assessment.

All of the above studies demonstrate the importance of combining different decision-making methods for accurate and flexible assessment of cloud infrastructure quality.

Research objective. This paper aims to contribute to the cloud infrastructure quality measurement field by using the introduced Hybrid Expert-derived with Entropy-based Weighted Sum Model (HEE-WSM), which can be applied to assess and improve the quality of cloud infrastructure.

Materials and methods. Cloud infrastructure quality assessment is a complex task that requires consideration of numerous technical and non-technical indicators. Most existing models use either subjective expert methods (e.g., AHP) or objective mathematical approaches (e.g., entropy, TOPSIS).

However, in a real environment, cloud services have both technical measurable characteristics (e.g., latency, availability) and values that depend on the specific user (e.g., security or cost priority). Therefore, it is important to create a model that combines both subjective and objective approaches.

In addition, the technical characteristics of cloud infrastructure can change in real time. For example, latency, throughput, and availability vary depending on the load. Therefore, the quality assessment model must be adaptive to changes in data and usage context. Traditional static ranking models do not take this dynamic into account.

The novel hybrid model should assume the current state of the cloud infrastructure as well as user preferences to be taken into account, enabling a more accurate and flexible assessment of the cloud services quality.

Moreover, the novel quality assessment model must be transparent and easily implementable in real-world Decision Support Systems (DSS). The considered WSM is interpretable and computationally simple, being suitable for integration into IT infrastructure management systems. Thus, the deeper analytical capability could be achieved by combining the WSM with a flexible weighting mechanism based on AHP and entropy calculations.

The cloud infrastructure quality assessment is based on internationally recognized standards, including NIST SP 800-145 (National Institute of Standards and Technology) [12] and ISO/IEC 25010 – a model for software and system quality [13].

These standards define a set of key characteristics that are given in Table 1. In the cloud computing context, these attributes are expanded by technical metrics (i.e., latency, throughput, and SLA compliance).

Table 1 – Cloud infrastructure quality criteria

Criterion	Acronym	Measurement unit	Description
Availability	C1	% uptime	Percentage of time the service is operational
Reliability	C2	hours	Mean Time Between Failure (MTBF)
Latency	C3	milliseconds	Response time for service requests
Scalability	C4	instances / minute	Ability to dynamically scale resources
Performance Efficiency	C5	requests / second	Number of successful requests per second (throughput)
Cost	C6	USD/hour	Pricing per resource unit (CPU, storage, etc.)
Security Compliance	C7	0-1	Compliance with standards (ISO 27001, HIPAA, etc.)
Support Responsiveness	C8	hours	Time taken to resolve support tickets

The proposed cloud infrastructure quality assessment model uses a hybrid weighting mechanism that combines subjective and objective approaches. This approach allows the accurate reflection of both user priorities and actual technical indicators of the cloud environment.

The model uses AHP for subjective weighting, where experts perform pairwise comparisons between criteria C1-C8, as it is demonstrated in Fig. 1. This allows the relative importance of each criterion to be identified in a specific context (e.g., critical applications, government services, business analytics, etc.).

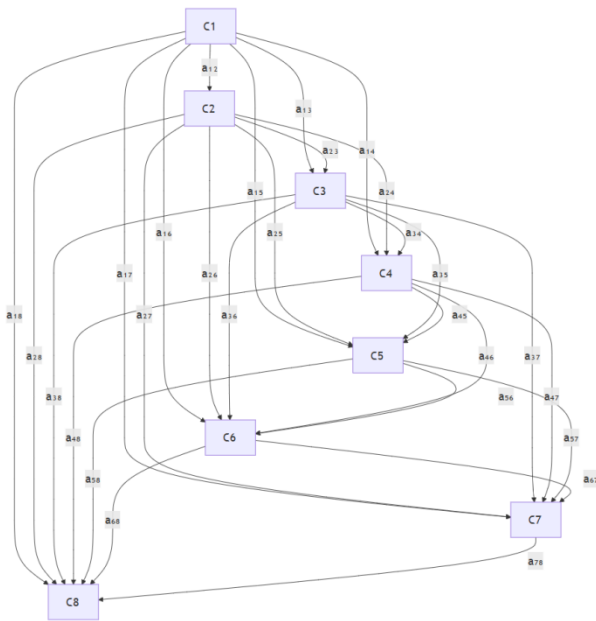


Fig. 1. Pairwise comparisons process between criteria C1-C8

The AHP proposed by Saaty [14] is well known and widely used in MCDM problems to determine priorities among alternatives based on pairwise comparisons.

At the same time, objective weights are calculated based on the entropy method, which analyzes the degree of variability (uncertainty) of criteria C1-C8 values in real measurements. The greater the dispersion in the values of a particular criterion, the higher its informational value and, accordingly, its weight. This objective approach is based on relevant cloud environment monitoring data (e.g., latency, uptime, number of failures).

The entropy method [15] is based on the assumption that the informational value of a criterion depends on the diversity (variability) of its values among alternatives. If the value of the criterion is the same for all objects, it has no discriminatory power and therefore has a low weight. If there is strong variability, the criterion has high informativeness and, accordingly, greater weight in the overall assessment.

Let us assume:

- m is the number of alternatives (e.g., cloud providers);

- n is the number of criteria;

- x_{ij} is the value of criterion j for alternative i .

The values of criteria should be normalized:

- for benefit-type criteria:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; \quad (1)$$

- for cost-type criteria:

$$p_{ij} = \frac{1/x_{ij}}{\sum_{i=1}^m (1/x_{ij})}. \quad (2)$$

During the cloud infrastructure quality assessment, a set of different criteria is applied, which are conditionally divided into two types: benefits and costs (Fig. 2).

Benefit criteria, such as availability (C1), reliability (C2), scalability (C4), throughput (C5), and security compliance (C7), reflect positive characteristics that should be as high as possible. The higher their values, the better the quality of service.

On the other hand, cost criteria, such as latency (C3), cost (C6), and support responsiveness (C8), are undesirable parameters, where lower values are better.

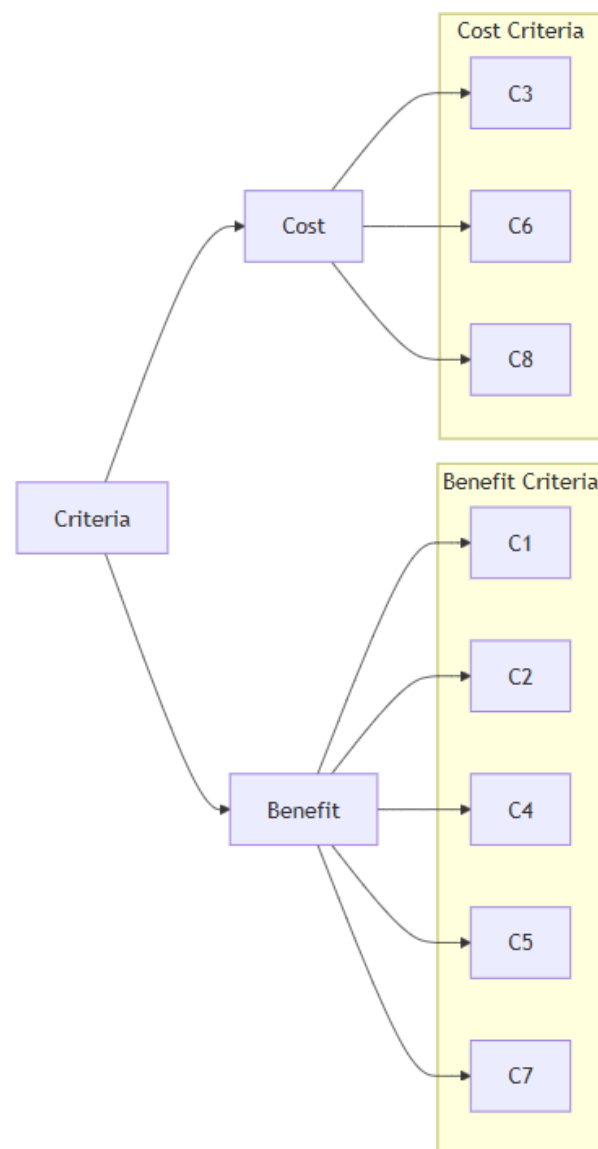


Fig. 2. Used criteria taxonomy

This differentiation of considered criteria is important for the correct data normalization, since multi-criteria analysis methods have different formulas for each type of criterion.

For each criterion the entropy is calculated:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}), k = \frac{1}{\ln(m)}. \quad (3)$$

If $p_{ij} = 0$, let us assume $p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) = 0$.

The degree of divergence (informativeness) is defined for each criterion:

$$d_j = 1 - e_j. \quad (4)$$

The lower the entropy e_j , the higher the dispersion of values x_{ij} , and therefore, the greater the significance of the criterion.

Therefore, weights are an objective assessment of the importance of each criterion based on actual changes in cloud environment monitoring data:

$$w_j^{entropy} = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}. \quad (5)$$

The final weight of each criterion is calculated as a combination of two components – AHP weight and entropy weight – taking into account the adjustable coefficient α , which allows balancing the influence of subjective and objective parts:

$$w_j = \alpha \cdot w_j^{AHP} + (1 - \alpha) \cdot w_j^{entropy}. \quad (6)$$

The value $\alpha = 1$ corresponds to a completely expert-based approach, while $\alpha = 0$ corresponds only to data from monitoring systems, $0 \leq \alpha \leq 1$. This ensures the model's adaptability to different usage scenarios.

This hybrid approach not only improves assessment accuracy, but also allows users to interactively change the assessment structure according to requirements or context (e.g., choosing a provider for critical services or for backup data storage).

Finally, the quality metrics are normalized based on:

- for benefit-type criteria:

$$q_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{i=1,m} x_{ij}}{\max_{i=1,m} x_{ij} - \min_{i=1,m} x_{ij}}; \quad (7)$$

- for cost-type criteria:

$$q_{ij} = \frac{\max_{i=1,m} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{i=1,m} x_{ij} - \min_{i=1,m} x_{ij}}. \quad (8)$$

The aggregated estimates of alternatives are defined using WSM:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot q_{ij}. \quad (9)$$

The alternatives (e.g., cloud providers, services, etc.) then ranked based on the total score Q_i , $i = \overline{1, m}$.

Moreover, the obtained weighted quality metrics of each alternative can be visualized using radar charts for multidimensional analysis.

The proposed approach to assessing the quality of cloud infrastructure combines expert assessments and monitoring data to create a balanced and flexible decision-making model (Fig. 3). The first stage involves selecting alternatives (e.g., cloud providers) and collecting values for eight key quality criteria (C1-C8) based on NIST and ISO/IEC 25010 standards. Next, the criteria are weighted

in parallel using two methods: expert and statistical. In the first scenario, the AHP method is used, where experts conduct pairwise comparisons of criteria and form a hierarchy of weights. In the second scenario, weights are calculated based on the entropy method, which takes into account the variability of data for each criterion.

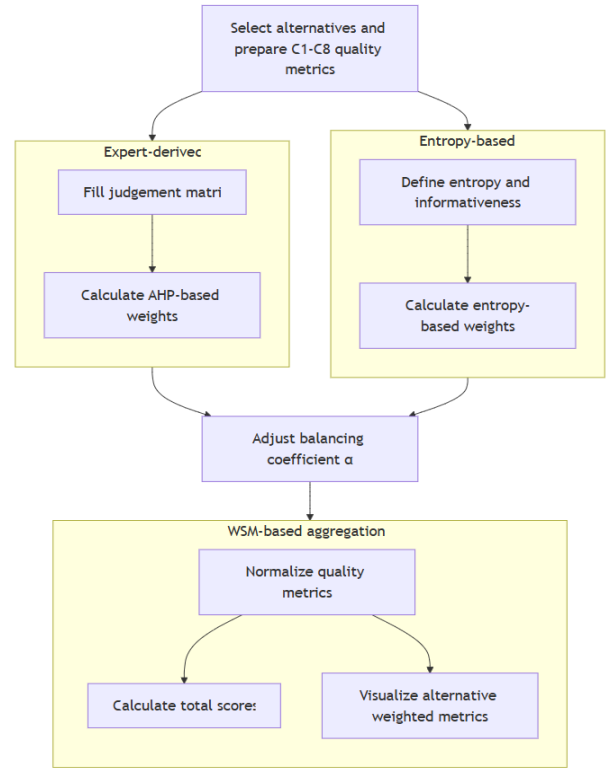


Fig. 3. Proposed approach

Both types of weights are combined using an adjustable balance coefficient α , which allows the model to be adapted to a specific context: the user can prioritize expert opinion or actual measurements. After calculating the combined weights, all criteria are normalized to align them on a scale. Then, the WSM is applied to calculate the total integral score for each alternative. At the final stage, the results are visualized, which makes it easy to compare alternatives and choose the best option.

Results and discussion. Using the proposed model, ten leading cloud service providers representing the main segments of the global market were analyzed.

These include Amazon Web Services (AWS) [16], Microsoft Azure [17], Google Cloud Platform (GCP) [18], IBM Cloud [19], Oracle Cloud Infrastructure [20], DigitalOcean [21], Alibaba Cloud [22], Linode [23], Vultr [24], and Hetzner Online [25].

These cloud providers were selected based on their widespread use, diversity of architectural solutions, and availability of open information on key quality indicators. Thus, the analysis covers both global (e.g., AWS, Azure, GCP) and mid-range providers with regional or specialized coverage (e.g., Linode, Hetzner, DigitalOcean), providing a complete picture of the cloud services market.

Tables 2 and 3 illustrate the different types of criteria used to assess the quality of cloud infrastructure. Table 2 contains benefit-type criteria, the values of which should be

as high as possible to achieve a better rating (C1, C2, C4, C5, and C7).

Table 2 – Benefit criteria values of cloud providers

Provider	C1	C2	C4	C5	C7
AWS	99.99	6000	25	3000	0.95
Microsoft Azure	99.95	5800	22	2800	0.93
Google Cloud	99.99	6200	28	3200	0.94
IBM Cloud	99.9	5500	15	2200	0.9
Oracle Cloud	99.92	5700	20	2500	0.88
DigitalOcean	99.85	5000	12	1800	0.75
Alibaba Cloud	99.94	5900	23	2900	0.9
Linode	99.8	4800	10	1700	0.7
Vultr	99.83	4900	11	1750	0.68
Hetzner	99.88	5200	14	1900	0.72

Table 3 denotes cost-type criteria (C3, C6, and C8), where lower values indicate higher service quality.

Table 3 – Cost criteria values of cloud providers

Provider	C3	C6	C8
AWS	95	0.6	1
Microsoft Azure	100	0.58	1.5
Google Cloud	90	0.62	1
IBM Cloud	110	0.65	2
Oracle Cloud	105	0.55	2.5
DigitalOcean	120	0.4	3
Alibaba Cloud	102	0.53	1.8
Linode	130	0.38	4
Vultr	125	0.35	4.2
Hetzner	115	0.3	3.5

These numbers (Table 2 and 3) are based on typical ranges reported in industry benchmarks and public SLAs for the given providers [16–25].

The sample pairwise comparisons between criteria C1-C8 (Table 4) shows the relative importance ratings of each pair of criteria according to the AHP [4], where the values reflect the one criterion's preference over another.

Table 4 – Pairwise comparisons between criteria C1-C8

Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	1	1	3	3	5	4	2	6
C2	1	1	3	3	5	4	2	6
C3	1/3	1/3	1	2	3	2	1	3
C4	1/3	1/3	1/2	1	2	2	1	2
C5	1/5	1/5	1/3	1/2	1	2	1	2
C6	1/4	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1	2
C7	1/2	1/2	1	1	1	1	1	2
C8	1/6	1/6	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1

Hence, the maximum eigenvalue is $\lambda_{max} = 8.33$ and the consistency index is:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} = \frac{8.33 - 8}{8 - 1} = 0.05. \quad (10)$$

Having the random index for $m = 8$ is equal to $RI = 1.41$, the consistency rate is:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.05}{1.41} = 0.03 < 0.1. \quad (11)$$

Since obtained CR value is less than 10%, the given in Table 4 pairwise comparisons between criteria C1-C8 can be considered to be consistent.

Table 5 shows the weights of criteria C1–C8 obtained using the AHP method (expert assessment) and the entropy approach (objective assessment based on data), as well as balanced weights calculated using the coefficient $\alpha = 0.5$, which ensures an equal contribution of both approaches.

Table 5 – Weights of criteria C1-C8

Criteria	AHP-based	Entropy-based	Balanced
C1	0.26	0.15	0.20
C2	0.26	0.14	0.20
C3	0.12	0.14	0.13
C4	0.09	0.11	0.10
C5	0.07	0.13	0.10
C6	0.06	0.12	0.09
C7	0.09	0.14	0.12
C8	0.04	0.06	0.05

Fig. 4 shows how balanced weights of criteria C1-C8 change when the coefficient α is changed from 0 to 1.

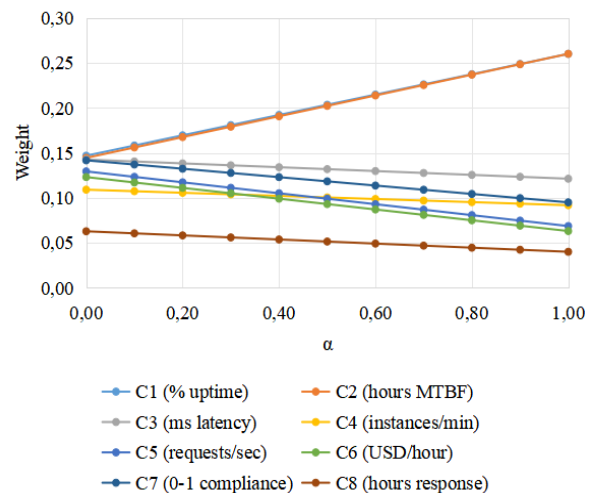


Fig. 4. Balanced weights of criteria with different α

Table 6 demonstrates normalized benefit-type criteria values obtained using (7) based on the original values from SLAs and benchmarks given in Table 3.

Table 6 – Normalized benefit-type criteria values

Provider	C1	C2	C4	C5	C7
AWS	1.00	0.86	0.83	0.87	1.00
Microsoft Azure	0.79	0.71	0.67	0.73	0.93
Google Cloud	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96
IBM Cloud	0.53	0.50	0.28	0.33	0.81
Oracle Cloud	0.63	0.64	0.56	0.53	0.74
DigitalOcean	0.26	0.14	0.11	0.07	0.26
Alibaba Cloud	0.74	0.79	0.72	0.80	0.81
Linode	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
Vultr	0.16	0.07	0.06	0.03	0.00
Hetzner	0.42	0.29	0.22	0.13	0.15

Table 7 outlines normalized cost-type criteria values obtained using (8) based on the original values from SLAs and benchmarks given in Table 4.

Table 7 – Normalized cost-type criteria values

Provider	C3	C6	C8
AWS	0.88	0.14	1.00
Microsoft Azure	0.75	0.20	0.84
Google Cloud	1.00	0.09	1.00
IBM Cloud	0.50	0.00	0.69
Oracle Cloud	0.63	0.29	0.53
DigitalOcean	0.25	0.71	0.38
Alibaba Cloud	0.70	0.34	0.75
Linode	0.00	0.77	0.06
Vultr	0.13	0.86	0.00
Hetzner	0.38	1.00	0.22

For example, the aggregated estimate for $i = 1$ (i.e. AWS provider) is calculated using WSM (9) as follows:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \sum_{j=1}^n w_j \cdot q_{1j} = \\
 &= 0.20 \cdot 1.00 + 0.20 \cdot 0.86 + 0.13 \cdot 0.88 + \\
 &+ 0.10 \cdot 0.83 + 0.10 \cdot 0.87 + 0.09 \cdot 0.14 + \\
 &+ 0.12 \cdot 1.00 + 0.05 \cdot 1.00 = 0.84.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Another aggregated estimate, i.e. for $i = 2$ (i.e. Azure provider) is calculated using WSM (9) as follows:

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= \sum_{j=1}^n w_j \cdot q_{2j} = \\
 &= 0.20 \cdot 0.79 + 0.20 \cdot 0.71 + 0.13 \cdot 0.75 + \\
 &+ 0.10 \cdot 0.67 + 0.10 \cdot 0.73 + 0.09 \cdot 0.20 + \\
 &+ 0.12 \cdot 0.93 + 0.05 \cdot 0.84 = 0.72.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Table 8 demonstrates weighted normalized values of benefit-type criteria (Table 6).

Table 8 – Weighted normalized benefit-type criteria values

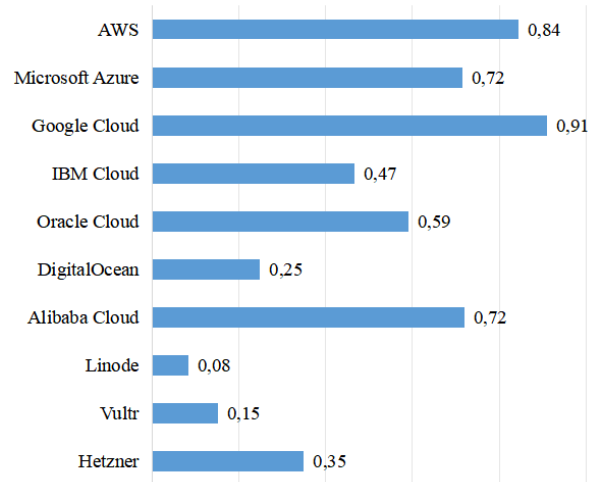
Provider	C1	C2	C4	C5	C7
AWS	0.20	0.17	0.08	0.09	0.12
Microsoft Azure	0.16	0.14	0.07	0.07	0.11
Google Cloud	0.20	0.20	0.10	0.10	0.11
IBM Cloud	0.11	0.10	0.03	0.03	0.10
Oracle Cloud	0.13	0.13	0.06	0.05	0.09
DigitalOcean	0.05	0.03	0.01	0.01	0.03
Alibaba Cloud	0.15	0.16	0.07	0.08	0.10
Linode	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Vultr	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00
Hetzner	0.09	0.06	0.02	0.01	0.02

Table 9 demonstrates weighted normalized values of cost-type criteria (Table 7).

Table 9 – Weighted normalized cost-type criteria values

Provider	C3	C6	C8
AWS	0.12	0.01	0.05
Microsoft Azure	0.10	0.02	0.04
Google Cloud	0.13	0.01	0.05
IBM Cloud	0.07	0.00	0.04
Oracle Cloud	0.08	0.03	0.03
DigitalOcean	0.03	0.07	0.02
Alibaba Cloud	0.09	0.03	0.04
Linode	0.00	0.07	0.00
Vultr	0.02	0.08	0.00
Hetzner	0.05	0.09	0.01

Fig. 5 shows the examples of the obtained total scores for each of the ten cloud providers, calculated using the WSM with balanced criteria weights, where the balance coefficient is $\alpha = 0.5$.

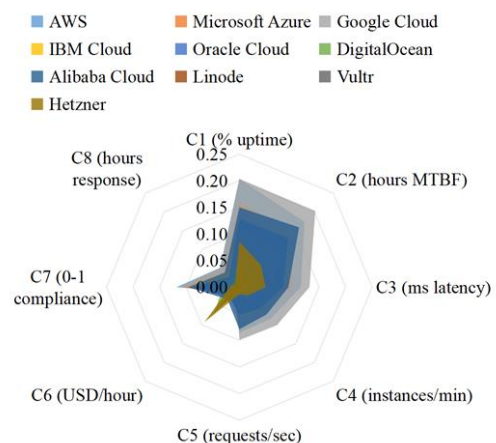
Fig. 5. Total quality assessment scores for $\alpha = 0.5$

The outlined example calculation takes into account expert assessments and objective weights obtained using the entropy analysis.

As can be seen from Fig. 5, GCP received the highest score (0.91), indicating its superiority in most key quality criteria. Next are AWS (0.84), Microsoft Azure (0.72), and Alibaba Cloud (0.72) which also have high scores.

In contrast, DigitalOcean (0.25), Linode (0.08), and Vultr (0.15) received the lowest scores, indicating limited compliance with the considered criteria.

Fig. 6 demonstrates domination of GCP and AWS on the radar chart.

Fig. 6 – Domination of GCP and AWS for $\alpha = 0.5$

Such a visual comparison of assessed cloud providers can be further developed to create interactive analytical dashboards to support intelligent decision-making. This can be achieved by introducing “what if” analysis and AI-driven conversational suggestions and insights.

Conclusion and future work. This study proposed a Hybrid Expert-derived with Entropy-based Weighted Sum Model (HEE-WSM) for the cloud infrastructure quality assessment, which combines the WSM with a dual criterion

weighting approach. This approach takes into account both subjective expert assessments (AHP-based) and objective statistical data (entropy-based), which allows achieving a balance between user judgment and technical indicators. The model uses eight quality criteria C1-C8 based on NIST and ISO/IEC 25010 standards, covering key parameters of cloud services, including availability, latency, scalability, cost, security, and others. The results of 10 leading cloud providers analysis show the robustness of the proposed approach for decision-making in the cloud environment.

In the future, the model should be extended by adding real-time monitoring and using machine learning methods to adjust weights based on load type and context

References

- Basu A., Ghosh S., Dutta S. An innovative approach of selecting cloud provider through service level agreements. *International Journal of Business Information Systems*, 2024. Available at : <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJBIS.2024.142190>. (accessed 10.03.2025).
- Xiao F., Fan W., Han L., Qiu T. Joint Service Deployment and Task Offloading for Datacenters with Edge Heterogeneous Servers. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2025. Available at : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10874186>. (accessed 10.03.2025).
- García-Ayllón S., Pilz J. Territorial spatial evolution process and its ecological resilience. *Frontiers in Environmental Science*, 2025. Available at : <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2025.1601067/full>. (accessed 11.03.2025).
- Hosseinzadeh M., Hama H. K., Ghafour M. Y. Service selection using multi-criteria decision making: a comprehensive overview. *Journal of Network and Systems Management*, 2020. Available at : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10922-020-09553-w>. (accessed 11.03.2025).
- Mahekar A. R., Li X., Sajjani D. K. Enhancing task scheduling and QoS optimization in mobile edge computing via microservice-oriented container selection. *Computing*, 2025. Available at : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00607-024-01410-x>. (accessed 16.03.2025).
- Krisnawijaya N. N. K. Architectural design of data management and analytics platforms for smart farming. *Wageningen University Research*, 2025. Available at : <https://research.wur.nl/en/publications/architectural-design-of-data-management-and-analytics-platforms-f>. (accessed 22.03.2025).
- Mostafa A. M. An MCDM approach for cloud computing service selection based on best-only method. *IEEE Access*, 2021. Available at : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9622259>. (accessed 22.03.2025).
- Nadeem F. A unified framework for user-preferred multi-level ranking of cloud computing services based on usability and quality of service evaluation. *IEEE Access*, 2020. Available at : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9208735>. (accessed 27.03.2025).
- Gireesha O., Somu N., Krithivasan K., VS S. S. IIVIFS-WASPAS: an integrated multi-criteria decision-making perspective for cloud service provider selection. *Future Generation Computer Systems*, 2020. Available at : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X19307307>. (accessed 27.03.2025).
- Tomar A., Kumar R. R., Gupta I. Decision making for cloud service selection: a novel and hybrid MCDM approach. *Cluster Computing*, 2023. Available at : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-022-03793-y>. (accessed 08.04.2025).
- Saha M., Panda S. K., Panigrahi S., Taniar D. An efficient composite cloud service model using multi-criteria decision-making techniques. *Journal of Supercomputing*, 2023. Available at : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-022-05013-1>. (accessed 13.04.2025).
- Mell P., Grance T. The NIST definition of cloud computing (Special Publication 800-145). *National Institute of Standards and Technology*, U.S. Department of Commerce, 2011. Available at : <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>. (accessed 13.04.2025).
- International Organization for Standardization. (2011). ISO/IEC 25010:2011 – Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models. Available at : <https://www.iso.org/standard/35733.html>. (accessed 15.04.2025).
- Saaty T. L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 2008. Available at : <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>. (accessed 15.04.2025).
- Mandal N., Sarkar P., Petrović N. Multi-criteria decision-making for ranking renewable energy sources: A case study from the Republic of Serbia. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 2025. Available at : https://library.acadlore.com/JEMSE/2025/4/2/JEMSE_04.02_03.pdf. (accessed 15.04.2025).
- Amazon Web Services. Available at : <https://aws.amazon.com>. (accessed 18.04.2025).
- Microsoft Azure. Available at : <https://azure.microsoft.com>. (accessed 18.04.2025).
- Google Cloud Platform. Available at : <https://cloud.google.com>. (accessed 18.04.2025).
- IBM Cloud. Available at : <https://www.ibm.com/cloud>. (accessed 18.04.2025).
- Oracle Cloud Infrastructure. Available at : <https://www.oracle.com/cloud>. (accessed 18.04.2025).
- DigitalOcean. Available at : <https://www.digitalocean.com>. (accessed 18.04.2025).
- Alibaba Cloud. Available at : <https://www.alibabacloud.com>. (accessed 18.04.2025).
- Linode (now part of Akamai). Available at : <https://www.linode.com>. (accessed 18.04.2025).
- Vultr. Available at : <https://www.vultr.com>. (accessed 18.04.2025).
- Hetzner Online. Available at : <https://www.hetzner.com>. (accessed 18.04.2025).

Received (надійшла) 28.09.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Копп Андрій Михайлович (Kopp Andrii) – доктор філософії, доцент, завідувач кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: andrii.kopp@khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>.

Дашківський Роман Борисович (Dashkivskyi Roman) – аспірант кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: roman.dashkivskyi@cs.khp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8066-3622>.

*О. О. ЛИСЕНКО, І. В. КОНОНЕНКО***МОДЕЛЬ ВИБОРУ СТОРОННІХ ІНСТРУМЕНТІВ В ІТ ПРОЕКТАХ**

Предметом дослідження є модель вибору сторонніх інструментів розробки в ІТ-проектах, що враховує трудомісткість, витрати, якість, ризики, технологічний ефект та обмеження проєктного середовища. Метою дослідження є інтеграція цих п'яти показників у єдину модель вибору сторонніх інструментів розробки шляхом формалізації задачі як багатокритеріальної оптимізаційної з чітко визначеними цільовими функціями та обмеженнями, що дає змогу усунути наявну прогалину в цій науковій сфері. До завдань дослідження належать: аналіз і узагальнення наукових підходів до оцінювання сторонніх інструментів розробки; встановлення відповідності критеріїв оцінювання інструменту цілям оцінювання ефективності його впровадження у проєкт; формалізація п'яти інтегральних показників у вигляді кількісної моделі, придатної до математичної обробки; побудова багатокритеріальної оптимізаційної моделі вибору інструментів з урахуванням ресурсних, бюджетних та якісних обмежень; демонстрація застосування моделі на числовому прикладі з кількома альтернативними інструментами. У дослідженні використано метод TOPSIS для ранжування альтернатив за інтегральними показниками, а також механізм штрафних функцій для врахування порушення критичних бізнес-обмежень. Отримані результати показують, що запропонований підхід дає змогу поєднати в єдиній формалізованій схемі оцінювання трудомісткості, витрат, якості, ризиків та технологічного ефекту сторонніх інструментів, уніфікувати різномірні оцінки в нормалізованій матриці рішень, обчислювати узагальнені показники привабливості альтернатив та враховувати штрафи за порушення обмежень. Числовий приклад демонструє ситуацію, коли найкращою виявляється альтернатива, що не є лідером за окремими критеріями, але забезпечує прийнятний баланс інтегральних показників без перевищення критичних обмежень. Висновки. Наукова новизна дослідження полягає у побудові першої формалізованої багатокритеріальної оптимізаційної моделі вибору сторонніх інструментів розробки, у якій виділено п'ять інтегральних показників, включно з технологічним ефектом, а також запропоновано їх кількісне подання. Запропонована модель, реалізована на основі методу TOPSIS зі штрафними функціями, розширює можливості систем підтримки прийняття рішень в ІТ-проектах, дозволяючи ранжувати альтернативи з урахуванням обмежень щодо ресурсів, бюджету, ризиків і якості у складних та динамічно змінюваних технологічних середовищах.

Ключові слова: сторонні інструменти розробки; міграція; багатокритеріальне прийняття рішень; TOPSIS; модель; оптимізація; вибір сторонніх бібліотек.

*A. LYSENKO, I. KONONENKO***SELECTION MODEL FOR THIRD-PARTY LIBRARIES IN IT PROJECTS**

This study focuses on a model for selecting third-party libraries in IT projects, taking into account efforts, costs, quality, risks, technological effects, and project environment constraints. The aim of the study is to integrate these five indicators into a cohesive model that formalizes the selection process as a multi-criteria optimization problem, with clearly defined objective functions and constraints. This approach addresses a significant gap in the existing area. The study tasks include analyzing and synthesizing scientific methods for evaluating third-party libraries, establishing the relationship between evaluation criteria and project effectiveness objectives, formalizing the five key indicators into a quantitative model suitable for mathematical processing, constructing a multi-criteria optimization model for library selection that considers resource, budgetary, and quality constraints, and demonstrating the model's application through a numerical example featuring several alternative libraries. The study employs the TOPSIS method to rank alternatives based on five indicators, alongside a penalty-function mechanism to address violations of critical business constraints. The results indicate that the proposed approach allows for a unified evaluation of effort, costs, quality, risks, and technological effects of third-party libraries. It successfully normalizes diverse assessments into a decision matrix, computes aggregate measures for the overall attractiveness of alternatives, and incorporates penalties for any constraint violations. The numerical example highlights a case where the optimal choice is not the leader in individual criteria but provides an acceptable balance of integral indicators without exceeding critical constraints. Conclusions: This study provides a novel contribution by developing the first formalized multi-criteria optimization model for selecting third-party libraries. This model identifies five indicators, including technological effects, and proposes their quantitative representation. Implemented using the TOPSIS method with penalty functions, the proposed model enhances the capabilities of decision-support systems in IT projects, enabling the ranking of alternatives while accommodating resource, budget, risk, and quality constraints in complex and dynamically changing technological environments.

Keywords: third-party libraries; migration; multi-criteria decision-making; TOPSIS; model; optimization; third-party library selection.

Вступ. У сучасних ІТ-проектах сторонні інструменти розробки стали невід'ємним елементом технологічного стека: вони прискорюють розроблення, знижують початкові витрати та дають змогу зосередитися на предметній області, а не на типових інфраструктурних задачах. Водночас використання таких інструментів супроводжується низкою ризиків – від залежності від конкретного постачальника й можливого припинення підтримки до прихованих витрат на інтеграцію, навчання команди та подальші міграції. На практиці вибір інструменту часто здійснюється на основі попереднього досвіду, рекомендацій колег або неформальних критеріїв, що ускладнює обґрунтування рішення та його відтворюваність у різних проєктах.

Стан досліджень. У науковій площині питання вибору сторонніх рішень традиційно розв'язувалося переважно для компонентів програмного забезпечення (COTS) та модульних програмних систем. Для таких задач запропоновано низку формальних моделей із чітко визначеними цільовими функціями, обмеженнями та методами знаходження оптимального набору компонентів. Натомість саме для сторонніх інструментів розробки, які працюють на рівні коду застосунку й безпосередньо впливають на архітектуру, супровід і еволюцію системи, формалізовані підходи лише починають формуватися. Більшість наявних досліджень зосереджені або на переліку факторів [1, 2, 3], що враховуються розробниками, або на побудові рекомендаційних систем [4, 5], які оптимізують точність передбачення вибору за історичними даними, але не інтегрують повною мірою трудомісткість,

витрати, якість, ризики та технологічний ефект у єдину модель. Наразі відсутні систематичні дослідження, що розглядають вибір сторонніх інструментів розробки як оптимізаційну задачу з формалізованими цільовими функціями та обмеженнями.

На цьому тлі особливу цінність набувають роботи, де вибір сторонніх інструментів розробки розглядається як формалізована задача прийняття рішень із заданою системою показників та визначеною процедурою оптимізації альтернатив. Саме до цього напрямку належать подані матеріали [6]: вони демонструють перші спроби поєднати структуровану оцінку бібліотек, візуальні засоби аналізу та математичні методи підтримки вибору, а також окреслюють прогалини, які надалі можуть бути заповнені шляхом побудови оптимізаційних моделей, що враховують комплексні проєктні цілі.

У науковій літературі як окремий, але суміжний із вибором сторонніх інструментів розробки напрям розглядаються також задачі вибору COTS-рішень, які становлять інтерес з огляду на запропоновані в них моделі та методи розв'язання задачі. Для коректного відмежування цих двох класів стороннього програмного забезпечення доцільно коротко уточнити їх відмінності.

COTS-рішення розглядаються як готові програмні продукти, що використовуються «як є» та впроваджуються й конфігуруються переважно на рівні всієї інформаційної системи або організації. Прикладами таких рішень можуть бути Jira, SAP, Salesforce, корпоративні системи класу CRM/ERP, платформи для керування документами тощо.

Натомість сторонні інструменти розробки виступають у ролі бібліотек, SDK та фреймворків, які інтегруються безпосередньо у програмний продукт на рівні вихідного коду та використовуються через API. На відміну від COTS-рішень, такі інструменти зазвичай підключаються до коду застосунку, збираються разом із застосунком, а команда проєкту має більший контроль над вибором версій, оновленнями та заміною цих компонентів.

У роботі [7] розглядається задача вибору COTS-компонентів для модульної системи програмного забезпечення. Для кожного модуля є кілька альтернативних COTS-продуктів, і потрібно обрати по одному варіанту так, щоб: максимізувати якість системи; не перевищити заданий бюджет на закупівлю компонентів. Це по суті перше формальне формулювання задачі «якість ↔ вартість» для COTS компонентів у вигляді оптимізаційної моделі. Обидві моделі — це формулювання задачі цілочисельного програмування з однією цільовою функцією (якість) і ресурсним обмеженням (вартість).

У роботі [8] розглядається задача побудови модульної програмної системи на основі COTS-компонентів. Для кожного модуля задається кілька альтернативних COTS-продуктів, які характеризуються числовими оцінками показників якості та вартості. Постановка формулюється як багатокритеріальна оптимізаційна модель: необхідно обрати рівно один варіант для кожного модуля так, щоб

отримана система одночасно задовольняла цільові орієнтири щодо якості та не перевищувала задані витратні обмеження. Модель включає три цільові функції — мінімізацію загальної вартості системи, мінімізацію часу виконання/постачання та максимізацію інтегрального показника якості — а також систему ресурсних обмежень і обмежень сумісності між компонентами. Розв'язання задачі здійснюється з використанням лексикографічного цільового програмування.

Робота [9] пропонує формальну оптимізаційну модель вибору компонентів для компонентно-орієнтованої програмної системи (CBSS). Автори виходять із підходу: спочатку формується набір модулів системи, а далі для кожного модуля потрібно обрати один із наявних варіантів компонента. Основний внесок роботи — врахування не лише функціональної придатності компонентів, а й їхнього впливу на структурну якість системи через показники залежності та цілісності між модулями. Формулюється двоцільова постановка: максимізація функціональної продуктивності/корисності всієї CBSS та одночасна максимізація цілісності й мінімізація залежності модулів. Для розв'язання задачі комбінаторної оптимізації використовується генетичний алгоритм, який шукає оптимальний набір компонентів по модулях.

Автори роботи [10] запропонували цілочислову оптимізаційну модель вибору програмних компонентів у ситуації, коли організація паралельно розробляє кілька застосунків. На відміну від більш ранніх моделей, що орієнтувалися на одну систему, автори вводять показник повторного використання компонентів і переглядають формулювання матриці сумісності, щоб одночасно оптимізувати повторне використання компонентів та їхню взаємну сумісність. Задачу розв'язують за допомогою спеціалізованого генетичного алгоритму, а результати демонструють, що спільна оптимізація для множини застосунків дозволяє досягти вищого рівня повторного використання і потенційно знизити сумарні витрати портфеля CBSD-проєктів.

У роботі [11] формалізують задачу вибору компонентів у CBSS як задачу цілочисельного лінійного програмування, у якій для кожного компонента вводяться бінарні змінні «обрано / не обрано». Цільова функція одночасно: максимізує внутрішньомодульні взаємодії, мінімізує витрати на розробку та адаптацію компонентів; а система обмежень забезпечує дотримання ресурсних обмежень і приблизно однакову «гранулярність» модулів (кількість компонентів у модулі). Модель розв'язується стандартними методами цілочисельної оптимізації.

Автори роботи [12] розглядають задачу оцінювання й вибору програмних компонентів для модульної системи, у якій одночасно розробляється кілька програмних застосунків. Для кожної функціональної частини системи передбачено кілька альтернативних компонентів: як готові комерційні програмні продукти. На першому етапі автори оцінюють альтернативи за низкою критеріїв (витрати,

час постачання або розробки, показники якості, надійність, можливість повторного використання, сумісність між компонентами) із використанням методу TOPSIS, у результаті чого кожному компоненту надається узагальнена числова оцінка придатності. На другому етапі будується багатокритеріальна оптимізаційна модель, яка одночасно вирішує, які саме компоненти обрати для кожного застосунку та в яких випадках доцільніше придбати готове рішення, а в яких – розробляти компонент самостійно. Цілі моделі полягають у підвищенні загальної якості системи та зниженні витрат і тривалості впровадження за наявності обмежень на надійність, сумісність і повторне використання компонентів. Для узгодження пріоритетів між цими цілями застосовується нечіткий інтерактивний підхід: особі, що приймає рішення, пропонуються варіанти рішень із різним ступенем задоволення за витратами, часом і якістю, після чого обирається прийнятний компроміс.

Робота [13] пропонує підхід до вибору програмних компонентів (COTS) на основі методики доказового міркування, яка спирається на теорію доказів Демпстера–Шефера. Автор формує ієрархію критеріїв якості (зручність, продуктивність, безпека, сумісність тощо) і задає оцінки компонентів у вигляді лінгвістичних рівнів із невизначеністю. Теорія доказів використовується для того, щоб кожна оцінка (з невизначеністю) стала доказом для рівня якості компонента. Ці оцінки перетворюються на ймовірнісні маси, агрегуються по всій ієрархії, після чого для кожного компоненту обчислюється очікувана корисність та інтервал впевненості. Докази комбінуються за узагальненим правилом Демпстера (ER-rule), яке базується на ортогональній сумі мас і враховує ваги критеріїв.

Робота [14] пропонує цілочисельну лінійну модель для задачі скорочення тривалості робіт шляхом додаткових ресурсів у проекті в СРМ-мережі, яка одночасно враховує час, вартість, якість і ризик. Автори інтегрують у цільову функцію: прямі витрати на скорочення робіт, витрати на забезпечення якості, витрати через дефекти, очікувані витрати від ризиків. Цільова функція мінімізує сукупну вартість проекту, а кінцевий строк виконання задається як жорстке обмеження. На прикладі невеликої СРМ-сітки автори показують, що модель дозволяє знайти такий варіант скорочення робіт і заходів з якості, який забезпечує виконання проекту в заданий термін при мінімальних сумарних витратах з урахуванням ризиків.

Класичні підходи до управління проектами описують проект через три ключові обмеження: час, вартість та якість. У більшості джерел ці обмеження розглядаються як взаємопов'язані змінні, де зміна одного параметра неминуче впливає на інші. З часом ця модель еволюціонує й доповнюється додатковими критеріями [15], зокрема ризиками та стратегічними вигодами, що відображає перехід від вузького розуміння «успіху за графіком і бюджетом» до орієнтації на досягнення результатів і довгострокового ефекту для організації.

У роботі [16] сформульовано концепцію піраміди управління проектом, у межах якої проект характеризують не лише класичною тріадою «час–вартість–якість», а сукупністю взаємопов'язаних вимірів: змістом, часом реалізації, вартістю, якістю продукту, ризиками та цінністю (ефектами) результатів проекту. Цінність трактується як багатовимірною характеристика, що може оцінюватися економічними, соціально-політичними, екологічними, технологічними ефектами.

У сфері програмної інженерії ці ідеї були конкретизовані в роботах Б. Боєма, у яких закладено засади економіки програмної інженерії. У його монографії «Економіка програмної інженерії» [17] трудомісткість, вартість, якість і ризики розглядаються як ключові змінні, що визначають доцільність і успішність програмних проектів, а завдання оцінювання зусиль, вибору альтернатив і порівняння сценаріїв прямо формулюються як проблеми багатокритеріальної оптимізації.

Паралельно з економічними моделями важливе місце посідає поняття якості. Міжнародний стандарт ISO 9000 визначає якість як «ступінь, до якого сукупність властивих характеристик об'єкта задовольняє споживача», що підкреслює її багатовимірний і відносний характер: якість завжди розглядається у зв'язку з набором очікувань і потреб зацікавлених сторін [18, 19].

Ще один системний блок критеріїв у сучасних моделях становлять ризики. У проектному менеджменті та інвестиційному аналізі дедалі ширше застосовуються багатокритеріальні методи оцінювання ризику, в яких імовірності настання подій, можливі збитки, чутливість проекту до змін середовища та інші фактори поєднуються в інтегральні показники «ризикованості» окремих сценаріїв або альтернатив [20].

Окремий блок сучасних досліджень пов'язаний із технологічною оцінкою та вибором технологій, де критерії групують ще й за вигодами, рівнем інноваційності, технологічною ефективністю та впливом на зацікавлені сторони [21].

Таким чином, проведений аналіз літератури засвідчує, що виокремлення інтегральних показників трудомісткості, витрат, якості, ризиків та технологічного ефекту узгоджується з ключовими напрямками розвитку проектного менеджменту, економіки програмної інженерії та багатокритеріальної оцінки технологій. Водночас у більшості виявлених досліджень детально опрацьовано лише один або два з перелічених показників, тоді як для комплексної підтримки прийняття рішень доцільним є одночасне врахування всіх п'яти показників та їхніх взаємозв'язків. Особливо показовим є те, що інтегральний показник технологічного ефекту фактично не формується як самостійний об'єкт аналізу: у наявних роботах розглядаються лише окремі його складові, фрагментарно та залежно від контексту дослідження. Виявлений розрив між теоретичними підходами та практичними потребами ІТ-проектів мотивує подальший виклад: наступні розділи статті

формалізують систему критеріїв для вибору сторонніх інструментів розробки та пропонують модель інтегральних показників, спеціально адаптовану до специфіки сучасних ІТ-проектів.

Мета статті. Метою є інтеграція показників трудомісткості, витрат, якості, ризиків та технологічного ефекту в єдину модель вибору сторонніх інструментів розробки шляхом формалізації цієї задачі як багатокритеріальної оптимізаційної з чітко визначеними цільовими функціями та обмеженнями, що дає змогу усунути наявну прогалину в цій сфері.

Відповідність систематизованих критеріїв інструменту цілям оцінювання ефективності його впровадження у проєкт. З метою спрощення

подальшого моделювання 44 критерії вибору інструменту згруповано у п'ять інтегральних показників, що відображають основні цілі оцінювання ефективності його впровадження в ІТ-проект: трудомісткість, витрати, якість, ризиків та технологічний ефект.

Таблиця 1 відображає відповідність між технічними критеріями інструменту та інтегральними показниками, які характеризують основні напрями оцінювання ефективності його впровадження. По вертикалі наведено технічні критерії інструменту, по горизонталі – інтегральні показники.

Таблиця 2 – відповідність між людськими критеріями та інтегральними показниками. Таблиця 3 – відповідність між економічними критеріями та інтегральними показниками.

Таблиця 1 – Відповідність технічних критеріїв інструменту цілям оцінювання ефективності його впровадження у проєкт

	Трудомісткість	Витрати	Якість	Ризики	Технологічний ефект
Зручність використання	✓		✓		
Рівень досконалості документації	✓		✓	✓	
Відповідність функціоналу цілям та завданням проєкту	✓		✓	✓	
Тестованість	✓		✓	✓	
Зрілість та стабільність	✓		✓	✓	✓
Частота випусків	✓		✓	✓	✓
Сумісність з іншими інструментами	✓		✓	✓	✓
Відповідність архітектурі проєкту	✓		✓	✓	✓
Кросплатформеність	✓		✓		✓
Нечітке визначення меж інтеграції інструменту і задач, котрі він вирішує	✓			✓	
Розмір інструменту	✓	✓			
Якість гарантійного та після гарантійного сервісу	✓	✓	✓	✓	
Активність підтримки	✓	✓	✓	✓	✓
План розвитку та стратегічне бачення			✓	✓	✓
Відповідність новизни інструменту рівню інноваційності цілей та завдань проєкту			✓	✓	✓
Продуктивність			✓	✓	
Рівень безпеки			✓	✓	
Стійкість до збоїв			✓	✓	

Таблиця 2 – Відповідність людських критеріїв інструменту цілям оцінювання ефективності його впровадження у проєкт

	Трудомісткість	Витрати	Якість	Ризики	Технологічний ефект
Досвід використання	✓		✓	✓	
Знання та сприйняття	✓		✓	✓	
Брак зацікавленості співробітників у проєкті	✓		✓	✓	
Згода з вибором	✓			✓	
Можливість знайти фахівців для підтримки інструменту	✓	✓		✓	✓
Складність вивчення	✓	✓		✓	
Компетентність команди	✓	✓	✓	✓	
Рейтинг розробника		✓		✓	✓
Популярність		✓		✓	✓
Відповідність корпоративній культурі та політиці				✓	

Таблиця 3 – Відповідність економічних критеріїв інструменту цілям оцінювання ефективності його впровадження у проєкт

	Трудомісткість	Витрати	Якість	Ризики	Технологічний ефект
Нереалістичність встановлених термінів впровадження	✓			✓	
Необхідний час на впровадження	✓	✓			
Витрати на використання та інтеграцію		✓			
Витрати на ліцензію для володіння		✓			
Зручність умов придбання		✓		✓	
Перевищення проєктних витрат над запланованим бюджетом		✓		✓	
Невигідний профіль грошового потоку		✓		✓	
Потрібні інвестиції перевищують очікуваний прибуток		✓		✓	
Вигода від використання (якщо можливо оцінити, то – дохід від використання)		✓		✓	✓
Розповсюдженість інструменту		✓		✓	✓
Підприємства (організації) розробника інструменту		✓		✓	✓
Імідж інструменту				✓	✓
Привабливість для споживачів				✓	✓
Країни походження інструменту				✓	
Відсутність схвалення фінансування з боку клієнта				✓	

Цільові функції. У моделі вибору інструменту розробки критерії згруповані у п'ять цільових функцій, кожна з яких відображає окремий вимір прийняття рішень. Припустимо розглядаються n інструментів, $j = 1, n$.

Трудомісткість – це сукупність людських ресурсів і зусиль, необхідних для освоєння, інтеграції/міграції, налаштування, документування, навчання та подальшого використання інструменту. Вони включають обсяг часу роботи. На трудомісткість впливають чинники (див. табл. 1 та 2), що визначають швидкість і ефективність адаптації: рівень досвіду та розподіл компетенцій у команді, потреба й обсяг навчання, якість і доступність документації/прикладів, а також складність вивчення та інтеграції інструменту в наявну архітектуру. Вагомими є й організаційно-соціальні чинники: готовність і мотивація команди, погодженість змін, реалістичність строків і доступність ресурсів. Серед технічних чинників — зрілість і стабільність інструменту, зручність API та наборів програмних інструментів, сумісність і наявність інтеграцій, можливості автоматизації, а також його розмір і зручність повсякденного використання.

Трудомісткість для інструменту j дорівнює:

$$E_j = \sum_{i=1}^{m_j} (E_{edu,ij} + E_{impl,ij} + E_{del,id}) + E_{use,j} \quad (1)$$

де m_j – кількість осіб, залучених до процесу впровадження інструменту j ;

$E_{edu,ij}$ – трудомісткість для особи i на освоєння інструменту j : вивчення принципів його використання, аналіз документації, дослідницькі активності, пов'язані з тим, як саме інструмент має бути інтегрований у проєкт;

$E_{impl,ij}$ – трудомісткість для особи i на впровадження інструменту j в проєкт: інтеграція в кодову базу, налаштування середовищ, CI/CD, міграція конфігурацій тощо;

$E_{del,id}$ – трудомісткість для особи i на видалення існуючого інструменту d , що замінюється інструментом j ;

$E_{use,j}$ – інтегральна трудомісткість подальшого використання інструменту j у типових повсякденних або періодичних повторюваних завданнях у процесі розробки продукту після його впровадження, розрахована для типового циклу розробки, прийнятого як період оцінювання.

Перша цільова функція описує мінімізацію трудомісткості, пов'язаної із впровадженням інструменту, і має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n E_j x_j \rightarrow \min_{x_j} \quad (2)$$

де x_j – бінарна змінна, що відображає вибір інструменту, $x_j \in \{0,1\}$.

Якщо проєкт вимагає вибору лише одного інструменту з множини доступних, додається обмеження:

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1$$

Для врахування обмеження часових ресурсів команди, яке визначає обсяг людських ресурсів, доступних для впровадження інструменту, вводиться умова:

$$\sum_{j=1}^n E_j x_j \leq E_{max}, \quad (3)$$

де E_{max} – максимальна трудомісткість, з якою зможе впоратися команда, тобто сукупний обсяг часових ресурсів команди, який може бути виділений на впровадження інструменту без перевищення можливостей команди.

Витрати – це сукупність фінансових і матеріальних ресурсів, необхідних для придбання, впровадження та подальшої підтримки інструменту. Вони охоплюють придбання ліцензії/підписки, оплату за навчання використанню, оплату консультацій та послуг постачальника інструменту, оплату праці при впровадженні інструменту. На витрати впливають такі чинники: бюджетні обмеження, ризик перевищення запланованих витрат, профіль грошових потоків і співвідношення очікуваних інвестицій та вигід від використання, умови придбання, зрілість постачальника, доступність фахівців для підтримки, валютні ризики, а також потенційний економічний ефект або дохід від застосування інструменту.

Витрати на оплату праці при впровадженні інструменту j визначаються як:

$$C_{wj} = \sum_{i=1}^{m_j} (E_{edu,ij} + E_{impl,ij} + E_{del,id}) r_i \quad (4)$$

де r_i – погодинна ставка особи i , яка бере участь у впровадженні інструменту.

Витрати на придбання прав на використання інструменту j командою розробки виконавця визначається як $C_{dev,j}$.

Витрати замовника на ліцензії або права користування інструментом j протягом періоду t років визначається як $C_{prod,j}$.

Витрати при експлуатації інструменту у замовника протягом періоду t років визначається як $C_{use,j}$.

Сумарні витрати на впровадження інструменту j становлять:

$$C_j = C_{wj} + C_{dev,j} + C_{prod,j} + C_{use,j} \quad (5)$$

Друга цільова функція для мінімізації витрат, пов'язаних із впровадженням інструменту, має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n C_j x_j \rightarrow \min_{x_j} \quad (6)$$

Для запобігання перевищенню бюджету вводиться обмеження:

$$\sum_{j=1}^n (C_{wj} + C_{dev,j}) x_j \leq C_{max,int} \quad (7)$$

де $C_{max,int}$ – максимально допустимі сукупні витрати на впровадження інструменту.

$$\sum_{j=1}^n (C_{prod,j} + C_{use,j}) x_j \leq C_{max,use} \quad (8)$$

де $C_{max,use}$ – максимально допустимі сукупні витрати на експлуатацію інструменту.

Під якість стороннього інструменту будемо розуміти похідну від загального визначення якості [21]. Якість стороннього інструменту – це його здатність задовольняти команди розробки та замовників продукту проекту.

Якість інструменту охоплює як технічні, так і організаційно-людські показники якості, що впливають на ефективність його використання у проекті (див. табл. 1 – 3).

Таким чином, якість інструменту визначає його технічну досконалість, зручність експлуатації та зрілість як продукту, що використовується у програмному середовищі проекту.

Якість інструменту j оцінюється як зважена сума його показників якості:

$$Q_j = \sum_{k=1}^{s_j} w_{kj} q_{kj}, \quad (9)$$

де s_j – кількість показників якості, що використовуються для оцінки інструменту j .

w_{kj} – ваговий коефіцієнт для показника якості k інструменту j .

q_{kj} – показник якості k інструменту j .

Третя цільова функція, що відповідає максимізації якості інструменту, має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n Q_j x_j \rightarrow \max_{x_j} \quad (10)$$

Ризики – це сукупність невизначеностей і потенційних вразливостей, пов'язаних із використанням інструменту протягом усього його життєвого циклу. Вони охоплюють технічні чинники (рівень безпеки, стійкість до збоїв, стабільність і частота випусків), організаційні аспекти (узгодженість із корпоративною культурою, підтримку з боку розробника чи спільноти, можливість знайти кваліфікованих фахівців, реалістичність термінів впровадження), а також економічні та зовнішні умови (ризик перевищення бюджету, невідповідний профіль грошових потоків, залежність від конкретної країни чи компанії-постачальника, відсутність фінансування з боку клієнта). Таким чином, ризики відображають імовірність того, що інструмент стане джерелом проблем чи обмежень у середньо- та довгостроковій перспективі (див. табл. 4).

Таблиця 4 – Визначення ризиків

Для команди розробника	Для замовника
Припустимо для інструменту j виявлено l_{dev} ризикових подій, $k = 1, l_{dev}$. Наслідки ризикової події k , оцінюються як $o_{dev,k}$. Ймовірність ризикової події k оцінюється як $p_{dev,k}$. Таким чином, ризик для команди розробника дорівнюватиме $R_{dev,j} = \sum_{k=1}^{l_{dev}} o_{dev,k} * p_{dev,k}$ (11)	Припустимо для інструменту j виявлено l_{prod} ризикових подій, $k = 1, l_{dev}$. Наслідки ризикової події k оцінюються як $o_{prod,k}$. Ймовірність ризикової події k оцінюється як $p_{prod,k}$. Таким чином, ризик у замовника дорівнюватиме $R_{prod,j} = \sum_{k=1}^{l_{prod}} o_{prod,k} * p_{prod,k}$ (12)

Четверта цільова функція, що відповідає мінімізації ризиків від впровадження інструменту, має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n (R_{dev,j} + R_{prod,j}) x_j \rightarrow \min_{x_j} \quad (13)$$

Технологічний ефект (див. табл. 5) – це стратегічна цінність інструменту, що виходить за межі його локального функціонального застосування. Він включає здатність інструменту забезпечувати

інноваційність, кросплатформеність, сумісність із іншими системами, відповідність архітектурі проекту й довгостроковим цілям розвитку організації, та відповідність трендам технологічного розвитку галузі. До цього напряму належать також план розвитку й стратегічне бачення постачальника, активність підтримки та репутація розробника. Важливими є й «м'які» чинники: популярність, імідж інструменту, його поширеність на ринку та привабливість для спільноти й кінцевих користувачів.

Таблиця 5 – Визначення технологічного ефекту

Для команди розробника	Для замовника
Нехай для інструменту j виявлено $\tau_{dev,j}$ технологічних ефектів, що очікуються після впровадження, $h = 1, \tau_{dev,j}$. $b_{dev,h,j}$ – ваговий коефіцієнт для ефекту h від інструменту j , $\pi_{dev,h,j}$ – оцінка ефекту h від інструменту j . Таким чином, технологічний ефект для команди розробника дорівнюватиме $T_{dev,j} = \sum_{h=1}^{\tau_{dev,j}} b_{dev,h,j} \times \pi_{dev,h,j}$ (14)	Нехай для інструменту j виявлено $\tau_{prod,j}$ технологічних ефектів, що очікуються після впровадження, $h = 1, \tau_{prod,j}$. $b_{prod,h,j}$ – ваговий коефіцієнт для ефекту h від інструменту j , $\pi_{prod,h,j}$ – оцінка ефекту h від інструменту j . Таким чином, технологічний ефект для команди розробника дорівнюватиме $T_{prod,j} = \sum_{h=1}^{\tau_{prod,j}} b_{prod,h,j} \times \pi_{prod,h,j}$ (15)

Сумарний технологічний ефект інструменту визначається як:

$$T_j = T_{dev,j} + T_{prod,j} \quad (16)$$

П'ята цільова функція для вибору інструменту з урахуванням технологічного ефекту має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n (T_{dev,j} + T_{prod,j}) x_j \rightarrow \max_{x_j} \quad (17)$$

Для розв'язання задачі вибору інструменту розробки пропонується використати метод багатокритеріального аналізу TOPSIS [6], який забезпечує гнучку процедуру визначення альтернативи, «найближчої до ідеалу», за наперед заданим користувачем набором критеріїв. Після нормалізації вихідних даних метод є критеріально незалежним, тобто не залежить від одиниць вимірювання та шкал оцінювання.

Проте застосування класичного методу TOPSIS дає змогу лише ранжувати альтернативи за сукупністю критеріїв, повністю ігноруючи наявні обмеження. Інакше кажучи, метод передбачає попередній відбір рішень із припустимої області: спочатку кожне рішення перевіряється на допустимість, а вже потім серед допустимих альтернатив визначається оптимальна.

Для усунення зазначеної прогалини доцільно модифікувати базовий підхід, інтегрувавши механізм урахування обмежень безпосередньо у процес розрахунків.

Одним із найгнучкіших способів реалізації такого механізму є використання штрафних функцій. Цей підхід передбачає модифікацію початкової матриці рішень до етапу нормалізації в алгоритмі TOPSIS. Альтернативи, що порушують задані обмеження, отримують штраф до своїх показників, що гарантує: підсумковий вибір буде не лише оптимальним за сукупністю критеріїв, а й припустимим з погляду бізнес-вимог. Запровадження штрафних функцій є

особливо доцільним у ситуаціях, коли незначне порушення обмеження (наприклад, перевищення бюджету на 2%) вважається прийнятним, тоді як істотні відхилення (перевищення на 50%) – ні.

Інтеграція способу полягає в модифікації початкового значення критерію x_{ij} до нового значення:

$$x_{pen,ij} = x_{ij} + P(x_{ij}), \quad (18)$$

де i – сторонній інструмент розробки як альтернатива, $i = \overline{1, m}$;

j – критерій оцінювання, $j \in \{E, C, R, Q, T\}$;

x_{ij} – оцінка значення критерію j для альтернативи i ;

$P(x_{ij})$ – штрафна функція. Для оцінки критерію x_{ij} з обмеженням x_{max} штрафна функція має вигляд:

$$P(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq x_{max} \\ k_{x_{ij}} \times (x_{ij} - x_{max}), & x_{ij} > x_{max} \end{cases} \quad (19)$$

де $(x_{ij} - x_{max})$ – абсолютна величина порушення,

$k_{x_{ij}}$ – коефіцієнт штрафу, що визначає наскільки критичним є кожна одиниця порушення. Велике значення коефіцієнта наближає до ситуації жорсткого штрафу.

Потрібно обрати один із трьох альтернативних інструментів розробки A_i для IT-проекту. Вибір ґрунтується на п'яти інтегральних критеріях, визначених у моделі, та обмеженнях, визначених у таблиці 6.

Таблиця 6 – Визначення інтегральних показників

Критерій	Трудомісткість	Витрати	Ризики	Якість	Техн. ефект
Позначення критерію	E	C	R	Q	T
Напрямок оптимізації	$\min$	$\min$	$\min$	$\max$	$\max$
Одиниця вимірювання	людино-годин	у.о.	оцінка 0-10	оцінка 0-10	оцінка 0-10
Обмеження	550	190	-	-	-
Коефіцієнт штрафу	1	10	-	-	-

Згідно з таблицею, значення критеріїв ризиків, якості та технологічного ефекту подаються у вигляді числових оцінок у діапазоні від 0 до 10. Для критеріїв якості та технологічного ефекту: чим нижчим є значення критерію (і чим ближче воно до 0), тим вищою є ймовірність того, що впровадження або заміна стороннього інструменту матиме потенційно негативний вплив на проєкт, тобто така оцінка фактично є негативним індикатором. Для критерію ризики: навпаки, чим нижчим є значення критерію (і чим ближче воно до 0), тим вищою є ймовірність того, що впровадження або заміна стороннього інструменту не матиме негативний вплив на проєкт.

Припустимо, що була проведена оцінка для всіх трьох інструментів за метриками та консолідовано значення метрик. Це дає змогу сформулювати початкову матрицю рішень.

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 500 & 150 & 6 & 7 & 8 \\ 350 & 200 & 4 & 9 & 7 \\ 600 & 120 & 8 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

Першим кроком є пошук критеріїв, які порушують обмеження, та застосування для них функції штрафів. Для знайдених критеріїв необхідно провести перерахунок. Наприклад, для альтернативи A_2 критерій C порушує встановлене обмеження. Відповідно перерахунок значення критерію C для альтернативи A_2 буде мати наступний вигляд:

$$P(x_{2C}) = 10 \times (200 - 190) = 100$$

$$x_{pen,2C} = x_{2C} + P(x_{2C}) = 200 + 100 = 300$$

Для альтернативи A_3 критерій E порушує встановлене обмеження. Відповідно перерахунок значення критерію E для альтернативи A_3 буде мати наступний вигляд:

$$P(x_{3E}) = 1 \times (600 - 550) = 50$$

$$x_{pen,3E} = x_{3E} + P(x_{3E}) = 600 + 50 = 650$$

Оновлена матриця рішень після застосування штрафів має вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 500 & 150 & 6 & 7 & 8 \\ 350 & 300 & 4 & 9 & 7 \\ 650 & 120 & 8 & 6 & 6 \end{pmatrix}$$

Наступний крок передбачає нормалізацію матриці рішень (оцінок метрик) $\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}}$ із використанням розрахованих коефіцієнтів (див. табл. 7) і перехід до зваженої нормалізованої матриці v_{ij} за допомогою ваг важливості (див. табл. 8).

$$v_{ij} = w_j \times \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}}, \quad (21)$$

де w_j – вага важливості метрики j , $w_j = \overline{0,1}$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$;

v_{ij} – зважена нормалізована оцінка метрики j для альтернативи i .

Таблиця 7 – Розрахований коефіцієнт $\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}$

	E	C	R	Q	T
$\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}$	891.63	356.23	10.77	12.88	12.21

Таблиця 8 – Ваги важливості метрик

	E	C	R	Q	T
w_j	0.15	0.30	0.10	0.35	0.10

Нормалізована матриця $\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}}$ має наступний

вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 0.561 & 0.421 & 0.557 & 0.543 & 0.655 \\ 0.393 & 0.842 & 0.371 & 0.698 & 0.573 \\ 0.729 & 0.337 & 0.743 & 0.466 & 0.491 \end{pmatrix}$$

Зважена нормалізована матриця v_{ij} має наступний вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 0.084 & 0.126 & 0.056 & 0.190 & 0.066 \\ 0.059 & 0.253 & 0.037 & 0.244 & 0.057 \\ 0.109 & 0.101 & 0.074 & 0.163 & 0.049 \end{pmatrix}$$

Визначення найкращих альтернатив для вибору v_j^* , при якому ми бажаємо мінімізувати E , C , R та максимізувати Q , T .

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 0.084 & 0.126 & 0.056 & 0.190 & \mathbf{0.066} \\ \mathbf{0.059} & 0.253 & \mathbf{0.037} & \mathbf{0.244} & 0.057 \\ 0.109 & \mathbf{0.101} & 0.074 & 0.163 & 0.049 \end{pmatrix}$$

Визначення найгірших альтернатив для вибору v_j' , при якому ми бажаємо максимізувати E , C , R та мінімізувати Q , T .

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} E & C & R & Q & T \\ 0.084 & 0.126 & 0.056 & 0.190 & 0.066 \\ 0.059 & \mathbf{0.253} & 0.037 & 0.244 & 0.057 \\ \mathbf{0.109} & 0.101 & \mathbf{0.074} & \mathbf{0.163} & \mathbf{0.049} \end{pmatrix}$$

Розрахунок відстані кожної альтернативи до ідеального рішення щодо вибору:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_j (v_j^* - v_{ij})^2}, \quad (22)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_j (v_j' - v_{ij})^2} \quad (23)$$

Відстані кожної альтернативи до ідеального рішення представлені у таблиці 9.

Таблиця 9 – Відстані до ідеального рішення

S_i^+	S_i^-
$A_1 \begin{pmatrix} 0.067 \\ 0.152 \\ 0.103 \end{pmatrix}$	$A_1 \begin{pmatrix} 0.134 \\ 0.102 \\ 0.152 \end{pmatrix}$

Вибір найкращої альтернативи здійснюється як $C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$, $0 < C_i^* < 1$:

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0.666} \\ 0.402 \\ 0.595 \end{pmatrix}$$

Інструмент A_1 є найкращим вибором. Це демонструє, що Інструмент A_1 є найбільш збалансованим та раціональним рішенням у цьому прикладі, оскільки він є єдиною альтернативою, що повністю відповідає встановленим бізнес-обмеженням. Його відносно високі трудомісткість та посередня якість є його головними недоліками, але вони повністю компенсуються відсутністю штрафів за порушення критичних обмежень. Водночас інструменти A_2 та A_3 отримали суттєві штрафи, які значно погіршили їхні підсумкові позиції, незважаючи на їхні переваги за окремими критеріями.

Висновки. У статті розглянуто багатокритеріальну оптимізаційну задачу вибору сторонніх інструментів розробки, для якої попередньо у науковій площині не було розроблено формальних оптимізаційних моделей з чітко визначеними цільовими функціями та обмеженнями.

Було згруповано систематизований набір критеріїв у п'ять інтегральних показників: трудомісткість, витрати, якість, ризики та технологічний ефект. Така класифікація дає змогу пов'язати окремі метрики з ключовими цілями проекту, а також забезпечує можливість подальшої формалізації задачі вибору інструменту як багатокритеріальної. Для кожного інтегрального показника запропоновано кількісне подання, що уніфікує різноманітні оцінки в числовому діапазоні та дозволяє виконувати подальшу математичну обробку.

Запропоновано модель вибору стороннього інструменту розробки, у якій показники трудомісткості, витрат, якості, ризиків та технологічного ефекту інтегровані в єдину формалізовану схему прийняття рішень. Модель реалізовано на основі адаптованого методу TOPSIS, доповненого механізмом штрафних функцій для

безпосереднього урахування бізнес-обмежень (зокрема бюджетних, часових та обмежень на ризики чи мінімально припустимий рівень якості). Це дозволяє ранжувати альтернативи за сукупністю критеріїв та враховувати, контролювати порушення критичних обмежень.

На числовому прикладі з чіткими даними та трьома альтернативними інструментами продемонстровано застосування запропонованого підходу. Показано, що найкращою альтернативою стає інструмент, який не є домінуючим за всіма окремими критеріями, але забезпечує збалансований профіль за інтегральними показниками та повністю відповідає заданим бізнес-обмеженням. Інструменти з кращими значеннями окремих показників, але з порушенням обмежень, отримують суттєві штрафи, що змінює їх на нижчі позиції в підсумковому ранжуванні. Це підтверджує спроможність моделі відображати реальні компроміси між ефективністю та допустимістю рішень.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонована модель та система інтегральних показників можуть бути використані як основа для побудови процедур і програмних засобів підтримки прийняття рішень щодо вибору сторонніх інструментів розробки в IT-проектах.

References

- Larios-Vargas E., Aniche M., Treude C., Bruntink M., Gousios G. Selecting third-party libraries: The practitioners' perspective. *Proceedings of the 28th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE '20)*, 8–13 November 2020, Virtual Event, USA. New York: ACM, 2020. P. 245–256. DOI: 10.1145/3368089.3409711.
- Tabassum M., Butt W. H., Muzaffar A. W., Lashari S. A. Selecting Third-Party Libraries: The Web Developers' Perspective. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2024. Vol. 34, No. 12. P. 1857–1893. DOI: 10.1142/S0218194024500402.
- Nadi S., Sakr N. Selecting third-party libraries: the data scientist's perspective. *Empirical Software Engineering*. 2023. Vol. 28. Art. 15. – DOI: 10.1007/s10664-022-10241-3.
- Nguyen P. T., Di Rocco J., Di Ruscio D., Di Penta M. CrossRec: Supporting software developers by recommending third-party libraries. *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol. 161. Art. 110460. DOI: 10.1016/j.jss.2019.110460.
- Jamwal A., Kumar S. A Multi-Scale Hypergraph-Based Approach for Third-Party Library Recommendation in Mobile App Development. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2025. DOI: 10.1145/3764114.
- Lysenko A., Kononenko I. How to select third-party library: harnessing visual insights and systematic evaluation for informed decisions. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. No. 1(113). P. 314–326. DOI: 10.32620/reaks.2025.1.20.
- Jung H.-W., Choi B. Optimization models for quality and cost of modular software systems. *European Journal of Operational Research*. 1999. Vol. 112, No. 3. P. 613–619. – DOI: 10.1016/S0377-2217(98)00169-6.
- Zachariah B., Rattihalli R. N. A multicriteria optimization model for quality of modular software systems. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 24, No. 6. P. 797–811. DOI: 10.1142/S0217595907001541.
- Kwong C. K., Mu L. F., Tang J. F., Luo X. G. Optimization of software components selection for component-based software system development. *Computers and Industrial Engineering*. 2010. Vol. 58, No. 4. P. 618–624. DOI: 10.1016/j.cie.2010.01.003.
- Tang J. F., Mu L. F., Kwong C. K., Luo X. G. An optimization model for software component selection under multiple applications development. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 212, No. 2. P. 301–311. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.01.045.
- Rafsanjani M. K., Rakhshan N. Using a 0/1 Knapsack Algorithm for Software Components Selection in Component-based Software System Development. *Journal of American Science*. 2011. Vol. 7, No. 12. P. 641–648.
- Verma S., Mehrawat M. K., Mahajan D. Software component evaluation and selection using TOPSIS and fuzzy interactive approach under multiple applications development. *Annals of Operations Research*. 2022. Vol. 312, No. 1. P. 441–471. DOI: 10.1007/s10479-018-3022-9.
- Nabot A. Software Component Selection: An Optimized Selection Criterion for Component-based Software Engineering (CBSE). *The International Arab Journal of Information Technology*. 2024. Vol. 21, No. 2. P. 211–225. DOI: 10.34028/iajit/21/2/4.
- Mahmoudi A., Feylizadeh M. R. A mathematical model for crashing projects by considering time, cost, quality and risk. *Journal of Project Management*. 2017. Vol. 2, No. 1. P. 27–36. DOI: 10.5267/j.jpmm.2017.5.002.
- Van Wyngaard C. J., Pretorius J. H. C., Pretorius L. Theory of the triple constraint – a conceptual review. *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2012)*, 10–13 December 2012, Hong Kong, China. Piscataway, NJ: IEEE, 2012. P. 1991–1997. DOI: 10.1109/IEEM.2012.6838095.
- Kononenko I. V., Fadeyev V. A., Kolisnyk M. E. Project scope optimization model and method on criteria profit, time, cost, quality, risk. *Integrating Project Management Standards: Proceedings of the 26th IPMA World Congress*, 29–31 October 2012, Conference Centre Creta Maris, Hersonissos, Crete, Greece. 2012. P. 286–292.
- Boehm B. W. *Software Engineering Economics*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.
- Open Textbooks for Hong Kong. Definitions of quality* [Electronic resource]. SCI S319 Quality Management For Science And Technology (Free Courseware). – 2016. – Available at: <https://www.opentextbooks.org.hk/ditatopic/10606> (accessed: 14 November 2025).
- ISO 9000:2015 *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
- Marle F., Gidel T. A multi-criteria decision-making process for project risk management method selection. *International Journal of Multicriteria Decision Making*. 2012. Vol. 2, No. 2. P. 189–223.
- Kozłowska J. Methods of multi-criteria analysis in technology selection and technology assessment: a systematic literature review. *Engineering Management in Production and Services*. 2022. Vol. 14, No. 2. P. 116–137. DOI: 10.2478/emj-2022-0021.

Надійшла (received) 05.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Лисенко Олександр Олександрович (Lysenko Alexander) – аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: alexander.lysenko.dev@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4962-5881>.

Кононенко Ігор Володимирович (Kononenko Igor) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; запрошений професор, Азербайджанський університет архітектури та будівництва, м. Баку, Азербайджанська Республіка, e-mail: igorvkononenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1218-2791>.

В. Ю. МОЙСЕЄВ, А. О. ЛИСЕНКО, І. В. ШУБА**РОЗРОБКА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВІДЕО-ІНТЕРВ'Ю
ДЛЯ АСИНХРОННОГО РЕКРУТИНГУ**

Стаття присвячена розробці та оцінці ефективності інтелектуальної системи для асинхронного відео-інтерв'ю, спрямованої на забезпечення об'єктивного оцінювання кандидатів та значне зменшення часових витрат рекрутерів. Використовуючи поєднання передових технологій штучного інтелекту, система аналізує відповіді кандидатів на основі великої мовної моделі GPT-4o від OpenAI для оцінки змісту та логіки відповідей, а також здійснює розпізнавання емоційної складової за допомогою нейронної мережі DeepFace, що аналізує невербальну поведінку кандидата. Таке поєднання технологій дозволяє не тільки автоматизувати процеси рекрутингу, але й підвищити об'єктивність і точність кадрових рішень. В результаті впровадження цієї системи компанії можуть значно знизити витрати часу і ресурсів на оцінку кандидатів, одночасно покращуючи якість відбору. У статті розглядаються основні функціональні та нефункціональні вимоги до системи, а також технічний стек, який використовується для її реалізації. Проведене експериментальне дослідження показує, що асинхронний формат відео-інтерв'ю дозволяє рекрутерам швидко отримувати структуровану аналітику без необхідності переглядати всі відеозаписи, що значно прискорює процес прийняття кадрових рішень. Результати тестування демонструють високу точність як в розпізнаванні емоцій, так і в оцінці змістовних відповідей кандидатів, що підвищує ефективність відбору і знижує ризики суб'єктивних помилок.

Ключові слова: асинхронний рекрутинг, асинхронне відеоінтерв'ю, DeepFace, GPT-4o, OpenAI API, розпізнавання емоцій, комп'ютерний зір, обробка природної мови, штучний інтелект, оцінювання кандидатів, об'єктивна оцінка, автоматизація HR-процесів, машинне навчання, оптимізація рекрутингу, аналіз невербальної поведінки, семантичний аналіз.

V. MOISEEV, A. LYSENKO, I. SHUBA**DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF AN INTELLIGENT VIDEO
INTERVIEW SYSTEM FOR ASYNCHRONOUS RECRUITMENT**

The article is focused on the development and evaluation of an intellectual system for asynchronous video interviews aimed at providing objective candidate assessments and significantly reducing the time costs for recruiters. By combining advanced artificial intelligence technologies, the system analyzes candidates' responses using the GPT-4o language model from OpenAI for content and logic evaluation, while also performing emotional recognition through the DeepFace neural network, which analyzes candidates' nonverbal behavior. This combination of technologies enables not only the automation of recruitment processes but also enhances the objectivity and accuracy of hiring decisions. As a result, the implementation of this system allows companies to substantially reduce time and resource expenditures for candidate evaluation, while improving the quality of recruitment. The article discusses the main functional and non-functional requirements of the system, as well as the technical stack used for its implementation. Experimental research demonstrates that the asynchronous video interview format enables recruiters to quickly access structured analytics without the need to review all video recordings, significantly speeding up the decision-making process. Test results show high accuracy in both emotional recognition and content evaluation of candidates' responses, which increases the efficiency of recruitment and reduces the risks of subjective errors.

Keywords: asynchronous recruiting, asynchronous video interview, DeepFace, GPT-4o, OpenAI API, emotion recognition, computer vision, natural language processing, artificial intelligence, candidate evaluation, objective assessment, HR automation, machine learning, recruitment optimization, nonverbal behavior analysis, semantic analysis.

Вступ. У сучасних умовах ринок праці вимагає від компаній швидких, точних та об'єктивних кадрових рішень. Традиційні живі співбесіди часто піддаються суб'єктивному впливу, що знижує якість відбору та призводить до втрати часу і ресурсів [1]. Цифрові технології трансформують традиційні методи підбору персоналу, зокрема активно впроваджуються відеоінтерв'ю як інноваційний інструмент оцінки кандидатів. Асинхронні відеоінтерв'ю стають перспективним інструментом, що дозволяє проводити оцінювання кандидатів без жорстких часових обмежень, при цьому автоматизувати та уніфікувати процес аналізу [2–9]. Асинхронні інтерв'ю – це якісний цифровий метод дослідження, в якому учасники відповідають на запитання, що ставляться їм через інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) та онлайн-платформи, такі як електронна пошта, аудіо, відео, соціальні мережі, додатки, онлайн-форуми та чати. Вони надають учасникам можливість обмірковувати запитання інтерв'ю та відповісти на них протягом узгодженого періоду часу [10].

У контексті розвитку технологій асинхронного відеоінтерв'ю на ринку існує кілька відомих рішень, які пропонують автоматизацію процесу оцінювання

кандидатів. Серед найбільш популярних конкурентів можна виділити платформи HireVue, Spark Hire, VidCruiter, MyInterview, а також ряд локальних та нішевих продуктів. Ці системи мають різний функціонал, але загалом вони прагнуть оптимізувати процес рекрутингу за допомогою відео, що записується кандидатами в зручний для них час [11].

HireVue – одна з найпоширеніших платформ, яка використовує штучний інтелект для аналізу як текстової інформації, так і невербальної поведінки кандидата. Вона застосовує алгоритми розпізнавання мови, оцінки міміки та тональності голосу. Spark Hire більше фокусується на організації відеоспівбесід, дозволяючи проводити як асинхронні, так і живі інтерв'ю з інтеграцією у різні HR-системи. VidCruiter пропонує комплексний набір інструментів, включно з автоматичною оцінкою, плануванням та аналітикою [12].

Однак при всіх перевагах ці системи мають певні недоліки, які обмежують їхню ефективність і зручність. По-перше, більшість існуючих рішень недостатньо глибоко аналізують зміст відповідей [13]. Часто їх алгоритми зосереджені на виявленні ключових слів або простих патернів у тексті, що не дає змоги

© В. Ю. Мойсєєв, А. О. Лисенко, І. В. Шуба, 2025

адекватно оцінити логіку, повноту чи контекст висловлювань кандидата. Через це автоматизована оцінка може бути поверхневою або неточною.

В роботі [14] авторами запропоновано 3D-систему віртуального інтерв'ювання Мауа, здатну генерувати релевантні та різноманітні додаткові питання на основі раніше поставлених питань та відповідей на них, використовуючи знання з глибоких попередньо навчених мовних моделей. Емпіричні результати показують, що followQG генерує питання, які люди оцінюють як високоякісні, досягаючи 77% релевантності.

Алгоритми III також використовуються в розробленому інноваційному боті для проведення співбесід [15], який вирішує питання готовності до співбесіди та стандартизованої оцінки. Система в першу чергу слугує практичною платформою для кандидатів, які шукають більш кількісний підхід до підготовки до співбесіди, а також може допомогти організаціям стандартизувати оцінку співбесід, потенційно переклавши початковий відбір кандидатів на автономних ботів, здатних оцінювати профілі кандидатів на конкретні посади. Використовуючи генеративні технології штучного інтелекту, комплексний банк питань та фреймворк WebRTC, ця платформа імітує реалістичний досвід співбесіди, покращуючи підготовку до співбесіди. Проте функціональність інтерв'ю має такі ключові недоліки, як відсутній аналіз невербальних відеосигналів (міміка, погляд, поза), банк запитань статичний і швидко втрачає актуальність, а взаємодія відчутно «AI-led» без природної ескалації до людини та налаштованих сценаріїв емпатійної комунікації.

Ще одним недоліком вищезазначених продуктів є відсутність гнучкості у налаштуванні критеріїв оцінювання. Більшість систем пропонує стандартні шаблони або обмежений набір параметрів, що не завжди відповідає специфічним вимогам конкретної компанії або вакансії. Це призводить до необхідності додаткової участі HR-спеціалістів у процесі корекції оцінок, що знижує рівень автоматизації. Крім того, деякі платформи мають обмежену інтеграцію з сучасними технологіями штучного інтелекту, зокрема з потужними мовними моделями останнього покоління, такими як GPT-4o. Це зменшує можливість з розширеного семантичного аналізу і ускладнює масштабування системи під великі обсяги даних.

Також варто відзначити питання конфіденційності та безпеки даних, адже не всі конкуренти приділяють достатню увагу захисту персональної інформації кандидатів, що може створювати юридичні ризики для компаній [16].

Постановка задачі. Таким чином, враховуючи значні досягнення в області асинхронного відеорекрутингу та недоліки існуючих платформ, розробка інтелектуальної системи відео-інтерв'ю для асинхронного рекрутингу із застосуванням найсучасніших технологій є актуальною. Для забезпечення об'єктивності оцінки у системі реалізовано два взаємодоповнюючі механізми: аналіз

відповідей за допомогою великої мовної моделі GPT-4o, що дає змогу враховувати зміст, логіку, релевантність, повноту відповідей та розпізнавання емоційної складової на глибокій нейронній мережі DeepFace, що аналізує невербальну поведінку кандидата: міміку, жести, мікровирази та інші сигнали. Таким чином система буде формувати комплексний профіль кандидата, який не тільки відображає професійні якості, але й особистісні характеристики, що дозволяє рекрутерам приймати більш обґрунтовані рішення.

Мета роботи. Спроекувати, реалізувати та емпірично оцінити інтелектуальну систему асинхронного відеоінтерв'ю, яка долає обмеження наявних платформ шляхом поєднання двох взаємодоповнювальних механізмів – семантичного аналізу відповідей за допомогою великої мовної моделі GPT-4o та розпізнавання невербальної поведінки на базі DeepFace – для формування комплексного профілю кандидата й забезпечення об'єктивності, прозорості та практичної ефективності прийняття кадрових рішень.

Основна частина. Виходячи з аналізу предметної області та визначення основних завдань, було сформовано вимоги до інтелектуальної системи асинхронного відеоінтерв'ю.

Функціональні вимоги:

- 1) реалізація у вигляді вебзастосунку з доступом через браузер, що забезпечує кросплатформність і зручність для кандидатів, HR-фахівців та адміністраторів;
- 2) підтримка асинхронного формату проходження інтерв'ю, тобто кандидати записують відповіді у зручний час без потреби участі HR у реальному часі;
- 3) розмежування ролей користувачів із відповідними правами доступу і функціоналом;
- 4) можливість створення вакансій, формування індивідуальних питань і надсилання запрошень HR-фахівцями;
- 5) прийом, збереження та обробка відеовідповідей через вебінтерфейс;
- 6) автоматичний аналіз відео за допомогою DeepFace для виявлення емоційного стану та OpenAI API (GPT-4o) для змістового аналізу відповідей;
- 7) відображення результатів у вигляді структурованих звітів з текстовою інтерпретацією, оцінками, графіками емоцій та висновками;
- 8) можливість для HR переглядати звіти, залишати коментарі, виставляти власні оцінки і приймати рішення у вебінтерфейсі;
- 9) зберігання історії відеоінтерв'ю та аналітики для подальшого перегляду.

Нефункціональні вимоги:

- 1) стабільна робота на основних браузерах та операційних системах;
- 2) оптимізація відеозаписів для високої якості з мінімальним навантаженням на систему;
- 3) інтуїтивно зрозумілий інтерфейс з мінімумом кроків для запуску інтерв'ю та перегляду результатів;

4) реалізація індикаторів стану завантаження, обробки відео і формування звітів;

5) масштабованість системи для підтримки зростаючої кількості кандидатів і користувачів.

На основі цих вимог було розроблено UML-діаграми, що деталізують логіку роботи ключових компонентів інтелектуальної системи та їхню взаємодію. На рисунку 1 представлено діаграму варіантів використання інтелектуальної системи

відеоінтерв'ю для асинхронного рекрутингу, яка інтегрує функціонал для двох основних категорій користувачів – кандидатів на посаду та рекрутерів, забезпечуючи повний цикл взаємодії від створення вакансії до оцінки відповідей та комунікації між сторонами. Use-case діаграма відображає основні сценарії, що охоплюють як технічні процеси збору й обробки даних, так і безпосередню взаємодію користувачів із інтелектуальною системою.

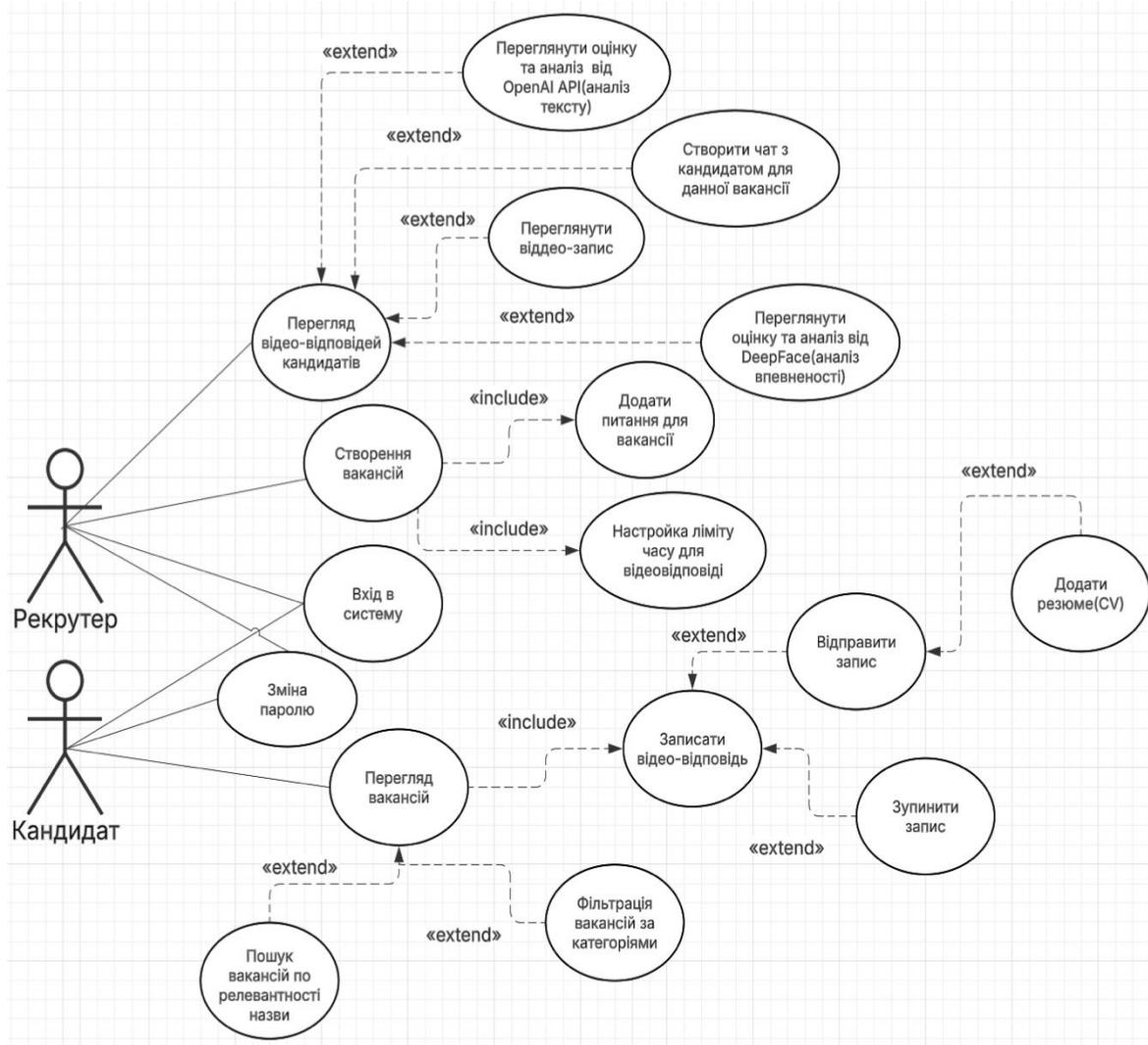


Рис. 1. Діаграма варіантів використання

Кандидат починає роботу із реєстрації, після чого отримує доступ до інтерфейсу пошуку вакансій. Він має можливість переглядати доступні пропозиції, шукати їх за назвою та застосовувати фільтри за категоріями для швидкого знаходження найбільш релевантних варіантів. Обравши потрібну вакансію, кандидат переходить до етапу підготовки відповідей, де може записати відео з відповідями на поставлені питання. Процес запису передбачає можливість паузи, а після завершення кандидат надсилає відео на обробку. Для надання додаткової інформації рекрутеру передбачено опцію додавання резюме.

Рекрутер, зі свого боку, має змогу створювати вакансії та формувати до них індивідуальні питання,

які будуть надсилатися кандидатам під час відеоінтерв'ю. Після отримання відповіді рекрутер може переглянути відеозапис та ознайомитися з оцінками, сформованими OpenAI API, які аналізують текстову частину відповіді, і з результатами аналізу DeepFace, що відображають емоційний стан і рівень впевненості кандидата на основі міміки та невербальних проявів. Якщо відповідь кандидата викликає інтерес, рекрутер може ініціювати чат для обговорення деталей вакансії або запросити претендента на наступний етап відбору.

Для кращого розуміння сутностей та їх зв'язків було розроблено структуру БД, яку представлено на рисунку 2.

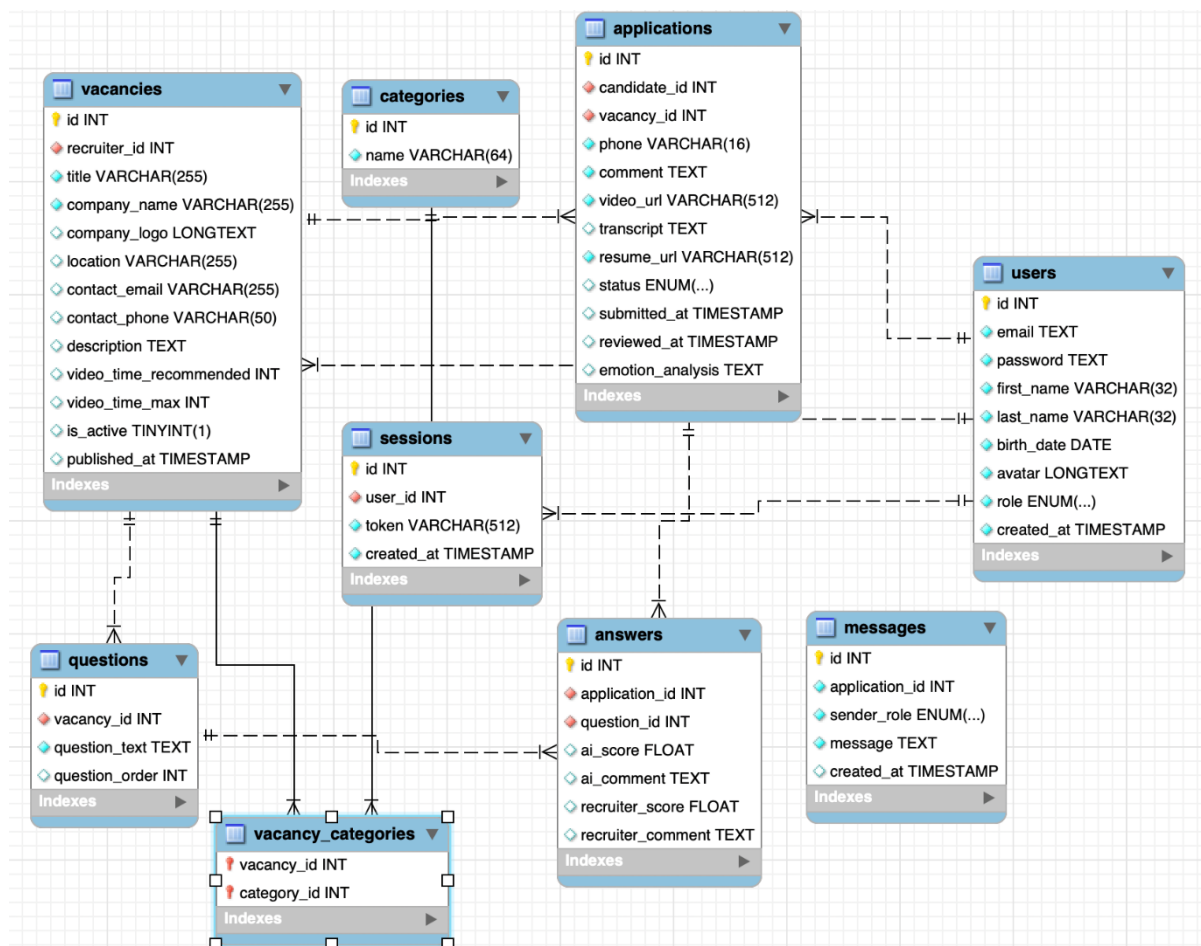


Рис. 2. Схема бази даних для інтелектуальної системи асинхронного рекрутингу

У спроектованій базі даних передбачено основні сутності, що відображають ключові об'єкти системи:

1) Користувачі (users) – зберігають інформацію про учасників системи, включно з кандидатами та рекрутерами. Серед атрибутів: ім'я, прізвище, дата народження, електронна пошта, пароль, роль, аватар, дата створення акаунту тощо;

2) Вакансії (vacancies) – містять дані про відкриті позиції, які створюють рекрутери. Включають назву вакансії, компанію, контактні дані, опис, рекомендований і максимальний час відеоінтерв'ю, статус активності, дату публікації;

3) Категорії (categories) – класифікують вакансії за сферами діяльності (наприклад, Software Development, Marketing, Data Science);

4) Зв'язок вакансій з категоріями (vacancy_categories) – реалізує багато-до-багатьох відношення між вакансіями та категоріями;

5) Заявки (applications) – зберігають інформацію про подані кандидатами заявки, включно з посиланнями на кандидатів і вакансії, контактним телефоном, коментарями, відеоінтерв'ю, транскриптами, резюме, статусом заявки, датами подання та перегляду, а також аналізом емоцій;

6) Питання (questions) – перелік запитань для кандидатів, які ставляться у рамках конкретної вакансії, із зазначенням порядку відображення;

7) Відповіді (answers) – зберігають відповіді кандидатів на запитання, включно з оцінками та коментарями від AI і рекрутера;

8) Повідомлення (messages) – зберігають листування між кандидатами і рекрутерами, пов'язане із заявками;

9) Сесії (sessions) – містять інформацію про активні сесії користувачів із токенами аутентифікації.

Таким чином, ця база даних створює комплексну структуру для керування користувачами, вакансіями, заявками та комунікацією, забезпечуючи цілісність і зручність роботи з даними.

Стек технологій для реалізації вимог. Для реалізації зазначених функціональних можливостей та забезпечення високої продуктивності й гнучкості інтелектуальної системи було обрано стек сучасних технологій, який оптимально відповідає вимогам проєкту.

Для створення клієнтської частини інтелектуальної системи використовується React – популярна JavaScript-бібліотека, що дозволяє будувати динамічні, інтуїтивно зрозумілі та кросплатформені інтерфейси. React забезпечує модульність та повторне використання компонентів, що спрощує розробку складних користувацьких інтерфейсів, зокрема для різних ролей користувачів: кандидатів, HR-фахівців і адміністраторів. Завдяки асинхронній роботі з API та

можливості оптимізації рендерингу, React гарантує швидку і плавну взаємодію користувача з вебзастосунком. Node.js використано як серверну платформу завдяки неблокуючій моделі введення/виведення (I/O) та здатності ефективно обробляти велику кількість одночасних запитів. Водночас масштабованість системи забезпечується архітектурними рішеннями: API реалізовано як stateless-сервіс, який горизонтально масштабується шляхом запуску кількох інстансів за балансувальником навантаження; ресурсоємні операції (зокрема обробка медіаданих та AI-аналіз) виконуються асинхронно у воркер-процесах через чергу задач; медіафайли зберігаються в окремому сховищі, а доступ до бази даних оптимізується за рахунок пулу з'єднань та індексування. Такий підхід дозволяє підвищувати пропускну здатність системи шляхом масштабування окремих компонентів залежно від характеру навантаження.

Для зберігання та управління даними використовується PostgreSQL – потужна реляційна база даних із відкритим кодом, відома своєю надійністю, масштабованістю та підтримкою складних запитів. PostgreSQL дозволяє ефективно зберігати інформацію про користувачів, вакансії, відеозаписи, аналітичні дані та історію інтерв'ю. Завдяки підтримці розширень і гнучкій структурі даних база відповідає вимогам безпеки.

Важливою складовою інтелектуальної системи є інтеграція з OpenAI API, зокрема з моделлю GPT-4o, що використовується для глибинного семантичного аналізу текстових відповідей кандидатів. Ця потужна мовна модель забезпечує розуміння контексту, оцінку логічності, повноти й релевантності відповідей, що значно підвищує якість автоматизованої оцінки. Використання OpenAI API дозволяє динамічно адаптувати критерії оцінювання за допомогою промптів, забезпечуючи гнучкість і точність результатів.

Для розпізнавання емоційної складової та невербальної поведінки застосовується DeepFace – сучасна нейронна мережа, що спеціалізується на аналізі обличчя, виявленні мікроекспресій, жестів і інших невербальних сигналів [8]. Інтеграція DeepFace дозволяє отримувати точні дані про емоційний стан кандидата, рівень стресу та впевненість, що доповнює текстовий аналіз і формує комплексний психологічний профіль.

Оптимізація глибокої нейронної мережі DeepFace. DeepFace, як зазначалося раніше – це глибока нейронна мережа, створена для аналізу обличчя та розпізнавання емоцій на основі зображень або відеоматеріалів. Модель відома своєю високою точністю, проте її внутрішня архітектура є закритою («чорна скринька»), що ускладнює безпосередню зміну параметрів чи структури. З огляду на це було розроблено методологію оптимізації процесу розпізнавання емоцій, яка полягає не у модифікації самої мережі DeepFace, а в математичній обробці та агрегуванні результатів аналізу відео з урахуванням основних проблем, які можуть виникати при використанні. Так,

відео-інтерв'ю, яке буде аналізуватися III, складається з великої кількості кадрів різної якості, серед яких є як інформативні кадри, так і неякісні розмиті, без чітких обличчя або з великою кількістю шуму, які можуть знижувати загальну точність оцінки, оскільки DeepFace аналізує обличчя кожен кадр. Це обумовлює необхідність створення надійного «усередненого» портрету емоційного стану людини в часових проміжках. На рисунку 3 представлена реалізація запропонованого підходу поетапного алгоритму оптимізації.



Рис. 3. Алгоритм оптимізації процесу розпізнавання емоцій нейронною мережею DeepFace

На першому етапі відбувається вибіркоковий аналіз кадрів з відео із семплюванням з метою зниження обчислювального навантаження та мінімізації впливу шумів. Аналіз відбувається з певним часовим інтервалом (за замовчуванням – 1 секунда). У межах цього інтервалу вибираються три рівномірно

розподілені кадри для обробки, що дозволяє зменшити кількість оброблюваних зображень і забезпечити більш стабільні дані для аналізу емоцій, знижуючи вплив випадкових аномалій.

Далі для кожного обраного кадру виконується виклик функції DeepFace.analyze з параметром, який зосереджується на розпізнаванні емоцій (actions=['emotion']) та вимкненням обов'язкового виявлення обличчя (enforce_detection=False). Такий підхід підвищує стійкість моделі до кадрів з неідеальним зображенням. Вихідними даними є ймовірності належності кадру до різних емоційних категорій (наприклад, радість, сум, гнів тощо). Якщо на кадрі не вдалося чітко виявити обличчя, такий кадр ігнорується в подальшому аналізі. Завдяки обробці винятків алгоритм працює без збоїв, навіть коли зустрічаються неінформативні кадри.

На наступному етапі відбувається агрегація результатів у межах інтервалу. Дані з усіх вибраних кадрів інтервалу збираються разом, після чого для кожної емоції обчислюється середнє значення. Це дає «усереднений» портрет емоційного стану за конкретний часовий відрізок.

Для більш глибокого розуміння якості розпізнавання проводиться додатковий статистичний аналіз та розраховуються наступні ключові метрики:

1) домінуюча емоція визначається як емоція з найбільшим середнім значенням у проміжку часу шляхом порівняння із другою за величиною емоцією (субдомінантою) через коефіцієнт співвідношення (diff_ratio), та показує ступінь впевненості моделі у виборі основної емоції;

2) ентропія розподілу оцінює рівень невизначеності або розсіювання ймовірностей серед

усіх категорій; низька ентропія свідчить про чітке домінування однієї емоції, висока – про неоднозначність.

3) дисперсія: вимірює варіативність значень емоцій, що відображає ступінь виразності різниці між ними.

Дані показники можуть бути використані як додаткові ознаки для подальшої обробки або для візуального відображення якості розпізнавання.

Огляд MVP інтелектуальної системи відео-інтерв'ю для асинхронного рекрутингу. Створена мінімально життєздатна версія (MVP) інтелектуальної системи для асинхронного відеоінтерв'ю забезпечує базовий, але ефективний набір функцій для попередньої оцінки кандидатів. Головною метою цієї системи є надання HR-фахівцям зручного інструменту для перегляду та аналізу відеовідповідей кандидатів, записаних у будь-який зручний для них час, з можливістю автоматичного аналізу змісту відповідей та візуалізації емоційного стану претендентів.

Система підтримує повний цикл від створення вакансії до отримання інтегрованої оцінки кандидатів. На етапі ініціалізації рекрутер формує картку вакансії (рис. 4,а), задаючи обов'язкові атрибути: назва компанії, географічне положення, контактні дані (email, телефон) та текстовий опис. Додатково встановлюються часові межі для відеовідповідей: рекомендований час та максимально допустимий час. Далі рекрутер наповнює вакансію набором запитань та прив'язує її до категорій/галузей для коректного маршрутизаційного та пошукового індексування (рис. 4,б).

а)

Рис. 4. Сторінки формування картки вакансій рекрутером

Email: email@gmail.com

Phone: +1999999999

Description: Main responsibilities: Corporate systems development Web services development Database design
Requirements: Higher technical education Deep knowledge and experience of C#, .Net, JavaScript, React Experience with SQL, Azure Will be a plus: Knowledge and application of Agile, SCRUM Design patterns knowledge Microsoft Dynamics 365 (CRM) SDK We offer: Full Software development cycle from software requirements preparation to ready system release Opportunity to work with the new technologies and corporate level platforms Opportunities for career and salary growth Flexible working schedule

EDIT VACANCY

Questions

Can you explain the difference between IEnumerable, IQueryable, and List in C#? When would you use each one?

What are the key principles of object-oriented programming (OOP) in C#, and can you give real-world examples of how you've applied them in your projects?

What is the difference between ref, out, and in parameters in C#? Can you provide use cases for each one?

New Question

ADD

б)

Рис. 4. Сторінки формування картки вакансій рекрутером

Кандидат у свою чергу взаємодіє із системою через персоналізовану головну сторінку (рис. 5), де доступний повний перелік активних вакансій, фільтрація за категоріями та пошук за назвою. Процес надання відповіді реалізовано у вигляді асинхронного відеозапису (рис. 6) коли кандидат самостійно запускає запис та послідовно відповідає на визначений перелік запитань у межах заданих часових параметрів. Такий

підхід знижує синхронні витрати часу для обох сторін, усуває календарні конфлікти та уніфікує умови оцінювання.

Для рекрутера передбачено кабінет оброблених записів, представлений на рисунку 7, у якому агреговано всі відеовідповіді, пов'язані з його вакансіями.

Рис. 5. Головна сторінка кандидата

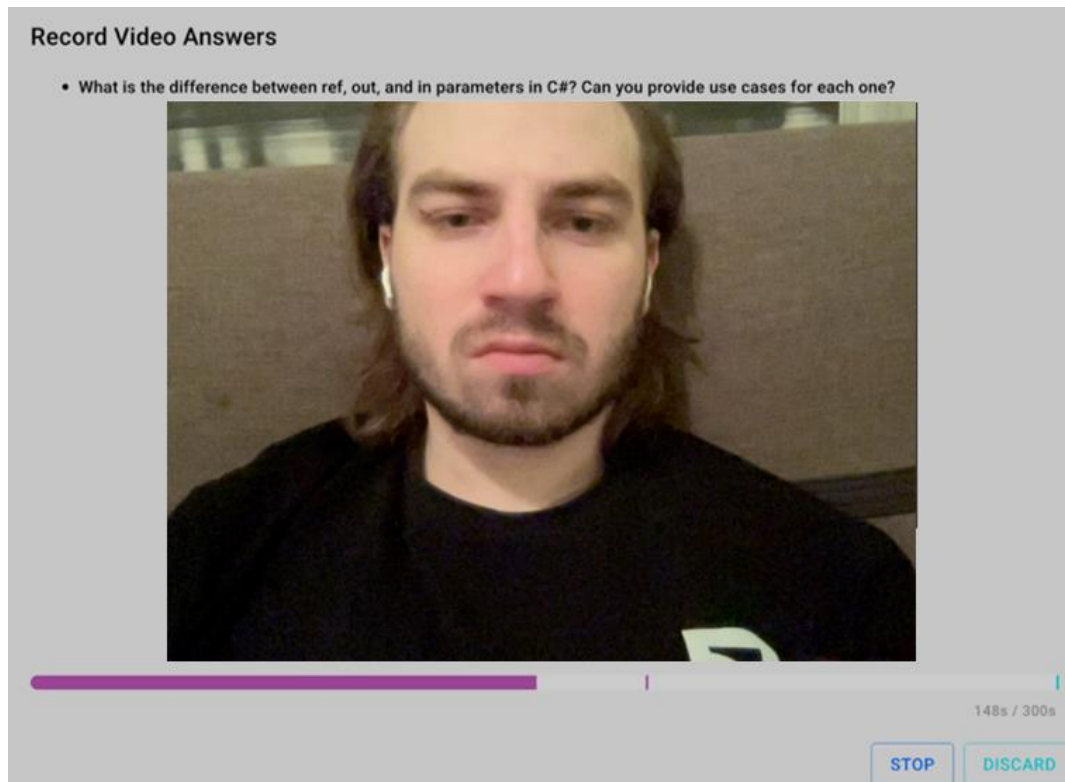


Рис. 6. Процес відео-запису кандидатом

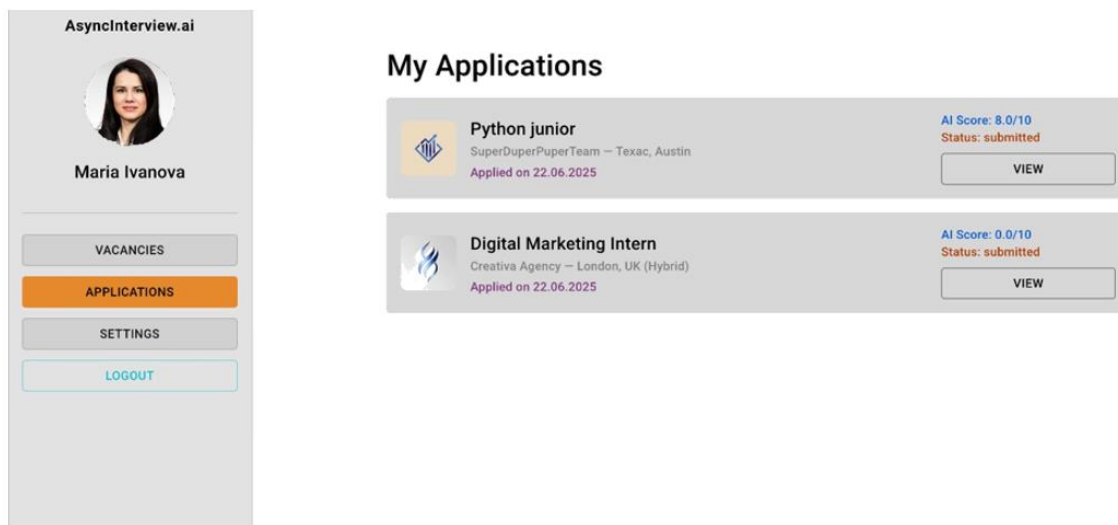


Рис. 7. Сторінка із відеозаписами для рекрутера

Перехід до конкретного інтерв'ю відкриває деталізовану сторінку аналітики, що охоплює чотири взаємодоповнювальні підсистеми. По-перше, відтворення відеовідповіді кандидата (рис. 8) забезпечує візуальну верифікацію змісту й невербальних сигналів у первинному джерелі. По-друге, модуль автоматичної транскрипції та комунікації (рис. 9) відображає текстову розшифровку мовлення, підвищуючи оглядовість і полегшуючи швидкий контент-аналіз; тут же доступний канал прямого повідомлення кандидату для запропонування уточнень або призначення наступних кроків. По-третє, підсистема емоційної/невербальної аналітики (рис. 10) здійснює оцінювання виразів обличчя та динаміки

реакцій кандидата під час відповіді. Розраховані показники інтерпретуються у вигляді узагальненого профілю, що доповнює вербальний зміст поведінковими маркерами (напр., стабільність емоційної лінії, наявність виразних коливань). По-четверте, модуль контент-аналізу відповідей (рис. 11) співвідносить сказане із запитаннями вакансії та критеріями оцінювання (релевантність, логічність, повнота, конкретика прикладів), відображаючи структуровану оцінку по кожному запитанню та загальну інтегральну метрику. У поєднанні з часовими обмеженнями це формує репродуковані умови порівняння між кандидатами й дозволяє стандартизувати прийняття рішень.

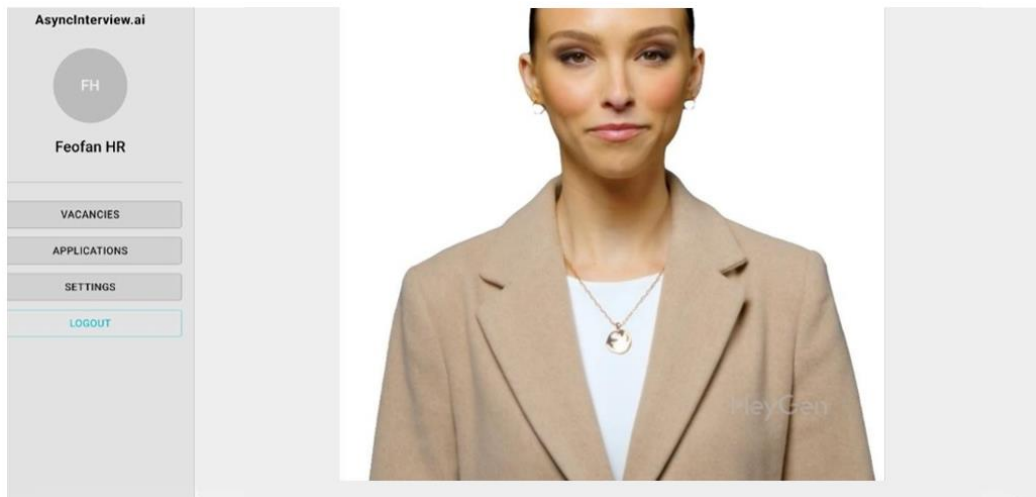


Рис. 8. Відео-відповідь кандидата

Chat with Candidate

Transcript:

Hi, my name is Maria Ivanova and I'm excited to apply for the junior Python developer position. I recently graduated with a degree in computer science and have been focusing on back-end development with Python. I enjoy solving problems with code and building things that make people's lives easier. One of the Python projects I'm most proud of was a RESTful API for a simple task management system. I built it using Flask and it included user authentication, task creation, and priority sorting. I used SQLAlchemy for database interactions and wrote unit tests with pytest to ensure everything worked correctly. It was my first time deploying an app to Heroku, which helped me understand real-world deployment challenges. When it comes to debugging and testing, I usually start by breaking the problem down. I use print statements or logging to trace where the issue might be happening and I rely heavily on Python's built-in debugger and stack traces. For testing, I like to write unit tests for functions as I build them and use tools like Postman to manually test APIs. I'm also comfortable using Git, writing clear documentation, and learning quickly from code reviews. I'm really excited about the opportunity to join your team and grow as a developer. Thank you for considering my application.

Рис. 9. Транскрипція та можливість написати кандидату

Emotion Analysis:

****Confidence Level**:** The candidate, Maria Ivanova, appears to have a high level of confidence. She introduces herself clearly and provides a detailed account of her skills, experiences, and accomplishments without any detected negative emotions. Her speech is consistent and she maintains a neutral emotion throughout the majority of her dialogue, suggesting she is comfortable and confident in her abilities. However, her emotional state shifts to sadness when expressing her excitement about the opportunity to join the team, which could indicate a lack of confidence or nervousness about the outcome of the application. Overall, her confidence level can be interpreted as high, with a slight dip towards the end of her speech.

****Deception Detected**:** There is no clear indication of deception in Maria's speech. Her emotional state remains neutral throughout most of her dialogue, which aligns with the content of her speech. However, there is a slight inconsistency when she expresses excitement about the opportunity to join the team, but her emotional state is detected as sad. This could be due to nervousness or anxiety about the outcome of the application rather than deception. Therefore, based on the available information, it is unlikely that deception is present.

****Psychological State**:** Maria's psychological state appears to be largely stable and calm, as indicated by her sustained neutral emotion throughout most of her speech. She seems to be focused and engaged in the conversation, demonstrating a clear understanding of her skills and experiences. However, the detected sadness when she talks about the opportunity to join the team could suggest feelings of anxiety or apprehension about the future. This shift in emotion could also indicate a high level of investment in the application process, suggesting that she deeply cares about the outcome. Overall, Maria appears to be calm and focused, with a possible hint of anxiety or nervousness towards the end of her speech.

Рис. 10. Емоційний аналіз кандидата на основі відео-відповіді

AI Review

Question #7

AI Comment: The candidate has a good understanding of Python and its associated frameworks. She has hands-on experience with Flask, SQLAlchemy, and pytest. She also understands the importance of unit testing and has experience with deploying applications using Heroku.

Score: 8/10

Question #8

AI Comment: The candidate has a systematic approach to debugging and testing. She uses print statements, logging, and Python's built-in debugger for debugging. She also writes unit tests during development and uses Postman for API testing. This shows a good understanding of best practices.

Score: 8/10

Рис. 11. Аналіз відповідей кандидата на питання для вакансії

Таким чином, запропонований продукт реалізує єдиний конвеєр асинхронного відбору:

- 1) постановка задачі та часових рамок рекрутером;
- 2) самостійний запис відповідей кандидатом у зручний час;
- 3) автоматизована транскрипція та візуально-поведінкова аналітика;
- 4) контент-оцінювання по рубриках і оперативний зворотний зв'язок;
- 5) централізоване робоче місце рекрутера для перегляду, порівняння та комунікації.

Архітектурно це забезпечує масштабоване зменшення витрат часу на етапах скринінгу та первинного інтерв'ю при збереженні прозорості критеріїв та відтворюваності процедур оцінювання.

Аналіз ефективності інтелектуальної системи відеоінтерв'ю для асинхронного рекрутингу. Оцінювання ефективності інтелектуальної системи відеоінтерв'ю ґрунтується на визначенні кількісних і якісних показників, поєднання яких дає її комплексну характеристику.

1. Аналіз точності розпізнавання емоцій.

Розпізнавання емоційної складової під час оцінювання кандидатів у форматі асинхронного відеоінтерв'ю є ключовим елементом сучасних рекрутингових технологій. Емоції як важливі невербальні сигнали несуть інформацію про мотивацію, рівень стресу, впевненість та загальний психологічний стан людини. Підвищення точності автоматичного розпізнавання емоцій сприяє покращенню якості кадрових рішень, що є основною метою розроблюваної системи. Для оцінки можливостей системи було проведено експериментальне дослідження із застосуванням вибірки з 10 відео тривалістю по 1 хвилині. Кожне відео було поділено на інтервали по 1 секунд для детального посекундного аналізу емоцій, що дозволило отримати докладний часовий ряд змін емоційного стану кандидатів.

Результати тестування наведені у таблиці 1, де порівнюється точність розпізнавання до та після проведення оптимізації.

Таблиця 1 – Точність розпізнавання емоцій до та після оптимізації роботи нейронної мережі

Показник	До тюнінгу	Після тюнінгу
Кількість проаналізованих інтервалів	600	600
Коректно розпізнаних емоцій	408 (68%)	540 (90%)
Некоректних розпізнавань	192	60
Абсолютне покращення точності	—	+22%

До оптимізації алгоритмів було проведено 10 незалежних тестів на вибірці з 600 секунд аналізу (10 відео × 60 секунд). Початковий рівень правильних розпізнавань емоцій становив близько 68%, тобто 408 випадків були ідентифіковані коректно, а 192 – ні. Цей показник є типовим для стандартних моделей, особливо при аналізі реальних відеоматеріалів, що містять шум, неповні кадри з обличчями, різні умови освітлення та інші фактори, які ускладнюють розпізнавання. Було встановлено, що основними причинами зниження точності на початковому етапі були:

- 1) фрагментарне або неповне виявлення облич на окремих кадрах, що призводило до відсутності чи спотворення даних;
- 2) наявність аномальних кадрів із розмиттям, тінями або іншими перешкодами;
- 3) внутрішня невизначеність моделі, пов'язана з

неоднозначністю класифікації емоцій навіть для передових нейронних мереж.

Для усунення цих проблем було впроваджено комплексну методологію тюнінгу, яка не потребувала змін у структурі чи вагах DeepFace, оскільки модель є закритою. Оптимізація полягала у вдосконаленні процесів вибіркового семплювання, статистичної обробки та агрегування результатів.

Основні елементи методики включали:

- 1) вибіркового аналізу кількох кадрів у межах кожного секундного інтервалу (`samples_per_interval = 3`), що зменшувало вплив випадкових помилок і неінформативних зображень;
- 2) фільтрацію та ігнорування кадрів без чітко виявлених облич, що виключало «порожні» дані з аналізу;
- 3) усереднення ймовірностей для створення стабільного профілю емоцій у кожному інтервалі;

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

4) використання додаткових статистичних показників – ентропії, дисперсії, співвідношення домінуючої і субдомінуючої емоції – для оцінки впевненості моделі.

Після впровадження тюнінгу було проведено ще 10 тестів на тих самих відеоданих, які показали суттєве підвищення якості розпізнавання: точність зросла до 90%. Таким чином, 540 із 600 інтервалів було ідентифіковано коректно, що на 132 випадки більше за початковий рівень. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих методів оптимізації. Вони демонструють, що навіть без доступу до внутрішньої структури глибокої мережі можна значно підвищити точність розпізнавання завдяки розумній обробці та агрегації вихідних даних.

Це покращення має важливе практичне значення, оскільки забезпечує рекрутерам достовірнішу інформацію про емоційний стан кандидатів, що сприяє більш обґрунтованому прийняттю рішень. Наявність додаткових метрик упевненості у результатах відкриває можливості для подальшого розвитку автоматизованих систем підтримки прийняття кадрових рішень.

2. Аналіз точності перевірки текстових відповідей. В інтелектуальній системі асинхронного рекрутингу використовується потужна велика мовна модель GPT-4o від OpenAI, інтегрована через OpenAI API, яка автоматично оцінює текстові відповіді кандидатів на різноманітні питання з різних галузей. Оцінювання здійснюється за шкалою від 0 до 10. Для перевірки точності таких оцінок було проведено відповідний аналіз на порівнянні виставлених GPT-4o балів із показниками семантичної близькості між відповіддю кандидата та еталонним текстом. Еталонні відповіді – це стандартизовані варіанти, що містять оптимальний набір інформації за темою. Семантична близькість відображає не буквально співпадіння слів, а рівень смислової відповідності текстів з урахуванням контексту. Для її обчислення застосовували сучасні моделі векторного подання тексту – Sentence Transformers. Вони переводять речення у багатовимірні вектори (ембеддинги), а косинусна схожість цих векторів слугує числовим показником близькості (масштабованим до діапазону 0–10 для зручності порівняння з оцінками GPT-4o).

Відмінність запропонованого підходу полягає в тому, що не просто порівнюється кореляція між оцінками GPT і семантичною близькістю, а вимірюється відносна похибка у відсотках. Для кожної пари «оцінка GPT – семантична близькість» розраховувалася відсоткова різниця (похибка). Якщо вона не перевищує 5%, відповідь вважається правильною оціненою, інакше – ні.

Цей метод має кілька переваг:

1) легкість і прозорість для розуміння, оскільки дає чіткий числовий критерій для прийняття рішення;

2) уникає складних статистичних метрик, які можуть бути неочевидними для користувачів;

3) дозволяє точково виявляти відповіді з коректною оцінкою та ті, що потребують додаткової уваги, з можливістю гнучкого налаштування порогу;

4) забезпечує об'єктивність, адже базується на семантичному аналізі, що враховує зміст, а не просто збіг слів.

Для перевірки узагальнюваності, стійкості до зсуву домену (під терміном «*домен*» в даному контексті розуміємо предметну область із власними типовими задачами, мовою/термінами, форматом «правильної» відповіді та критеріями якості) та валідації рубрик оцінювання в різних типах завдань, було сформовано контрольні набори запитань і еталонних відповідей у п'яти галузях, що суттєво відрізняються за когнітивним профілем і форматом правильної відповіді:

1) інформаційні технології та програмування – логічні задачі, алгоритми, фрагменти коду (перевірка точності, формальної коректності та крокової логіки);

2) архітектура та будівництво – технічні описи й проектні рішення (оцінка структурованості аргументації та відповідності вимогам);

4) медицина – клінічні кейси, діагностика, лікувальні протоколи (перевірка доменної коректності, посилення на стандарти й ризиків помилок);

5) дизайн – візуальна комунікація, UX/UI, креативні концепції (оцінка якості обґрунтування суб'єктивних рішень і принципів HCI);

6) фінанси – економічний аналіз, звітність, розрахунки (перевірка числової точності, відтворюваності та логіки висновків).

Така багатогалузева вибірка дає можливість виміряти не лише середню результативність системи, а й варіативність якості між доменами, виявити упередження та/або вузькі місця, і, зрештою, підтвердити, що інтегральні метрики відображають реальні компетентності кандидатів у широкому спектрі професійних сценаріїв.

Джерелами еталонів стали офіційна документація, навчальні курси (Coursera, університетські матеріали), клінічні настанови BOO3 і Medscape, бізнес-кейси та фінансові стандарти. Результати аналізу наведено у таблиці 2, яка містить кількість тестових відповідей, середню оцінку GPT-4o, середнє значення семантичної близькості (у масштабі 0–10), середню відносну похибку, а також відсоток відповідей, які пройшли перевірку (похибка $\leq 5\%$).

Таблиця 2 – Порівняння оцінок GPT-4o із семантичною близькістю за різними галузями

Спеціалізація	Кількість відповідей	Середній бал ChatGPT (0-10)	Середня семантична близькість (0-10)	Середня відносна похибка (%)	Частка пройдених (%)
ІТ та програмування	20	7,9	7,8	3,4	95
Архітектура	20	7,3	7,1	4,1	92
Медицина	20	8,2	8,0	3,2	97
Дизайн	20	7,5	7,4	4,8	82
Фінанси	20	7,7	7,6	3,9	93

Як видно з таблиці 2, GPT-4о демонструє високу відповідність оцінок із семантичною близькістю в усіх спеціалізаціях. Середня відносна похибка не перевищує 5% для більшості випадків, що свідчить про здатність системи ефективно оцінювати змістовну якість відповідей без необхідності залучення людських експертів. Незначні розбіжності в оцінках зазвичай виникають у випадках, коли кандидат дає нетипову, розширену або додаткову інформацію, яка хоч і відрізняється від еталонної відповіді, але є змістовною і релевантною.

3. Порівняння ключових метрик з традиційним рекрутингом. Ефективність будь-якої нової системи оцінюється шляхом порівняння її ключових показників із результатами традиційних підходів. У сфері рекрутингу одним із визначальних параметрів є час, який витрачають різні учасники процесу – рекрутери, технічні спеціалісти та інші залучені співробітники. Саме цей показник має безпосередній вплив на продуктивність компанії та вартість найму одного кандидата.

У більшості компаній традиційний процес рекрутингу складається з двох основних етапів. Перший – скринінг, який передбачає попередній відбір кандидатів. На цьому етапі рекрутер переглядає резюме, перевіряє відповідність формальним вимогам (наявність диплома, досвіду роботи, ключових навичок) та може проводити коротку телефонну співбесіду для уточнення базових деталей та оцінки soft skills. Другий етап – технічна співбесіда, яку зазвичай проводить спеціаліст із відповідної галузі, де оцінюються професійні знання кандидата, вміння розв'язувати практичні завдання та застосовувати свої навички в умовах, наближених до реальних.

Запропонована інтелектуальна система асинхронного рекрутингу поєднує ці етапи в більш оптимізованій формі. Завдяки автоматизації попереднього відбору та можливості оцінки технічних відповідей у записаному форматі з використанням штучного інтелекту значно скорочується навантаження на персонал і час, необхідний для аналізу кожного кандидата.

Розроблена система генерує два типи автоматичних звітів, корисних для учасників процесу найму. Перший – це звіт з емоційного аналізу, який описує емоційний стан кандидата (частота позитивних і негативних емоцій, емоційна стабільність, реакції на складні питання). Такий звіт є особливо цінним для HR, оскільки дозволяє інтерпретувати soft-skills, рівень мотивації, стресостійкість і культурну сумісність кандидата. Другий – це звіт з текстового аналізу відповідей, який узагальнює смислову насиченість та релевантність відповідей (виділення ключових тез, відповідність технічним вимогам, виявлення

суперечностей). Цей звіт спрощує роботу технічного спеціаліста, оскільки дозволяє оцінити предметну компетентність без необхідності прослуховувати повний запис інтерв'ю.

Як базовий часовий показник для порівняння було обрано час, витрачений HR і технічним спеціалістом на перевірку результатів кандидата. У традиційному рекрутингу цей час включає скринінг (читання резюме й коротка розмова з кандидатом) та повну технічну співбесіду. У розробленій системі відео-інтерв'ю він відповідає часу, необхідному для ознайомлення зі звітами емоційного та текстового аналізу і прийняття рішення.

Для перевірки ефективності запропонованої інтелектуальної системи було проведено експериментальне дослідження, у якому взяли участь три рекрутери та п'ятеро технічних спеціалістів, кожен з яких мав досвід професійної діяльності понад п'ять років. На першому етапі було визначено часові витрати у межах традиційного процесу скринінгу. Як показує практика, рекрутери витрачали на попередній перегляд та оцінювання одного кандидата від 10 до 20 хвилин залежно від індивідуальних особливостей поданих матеріалів та власної методики аналізу. В більшості випадків цей показник складав приблизно 15 хвилин на одного кандидата, що підтверджує високий рівень часових затрат при значній кількості заявок.

На другому етапі досліджено ефективність використання системи асинхронного рекрутингу. Кожен із рекрутерів витрачав приблизно 2 хвилини незалежно від тривалості відеоінтерв'ю кандидата, оскільки система автоматично формувала структурований емоційний звіт строго визначеного обсягу та формату. Це дозволяло рекрутерам швидко ознайомитися з ключовими показниками та зробити висновки без необхідності переглядати весь відеоматеріал.

Окрему увагу було приділено роботі технічних спеціалістів, які виконували оцінювання професійної компетентності кандидатів на основі перегляду відеоінтерв'ю. Для експерименту було створено три вакансії з відео максимальною тривалістю 10, 30 та 60 хвилин, при цьому в традиційному процесі технічна співбесіда тривала б стільки ж. У системі асинхронного рекрутингу часові витрати спеціалістів склали близько 3 хвилин для десятихвилинного відео, 9 хвилин для тридцятихвилинного та 18 хвилин для годинного відео. Таке зростання часу пояснюється збільшенням обсягу інформації, яку потрібно опрацювати, проте навіть у цьому випадку ефективність залишалася значно вищою порівняно з традиційним підходом, де аналіз відбувався повністю вручну і займав значно більше часу. Результати дослідження представлено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняння часу витраченого персоналом у традиційному та асинхронному рекрутингу

Етап / Тривалість інтерв'ю	Традиційний рекрутинг (хв)	Асинхронний рекрутинг (хв)
Скринінг (HR)	15	2
Технічна співбесіда / інтерв'ю 10 хв	10	3
Технічна співбесіда / інтерв'ю 30 хв	30	9
Технічна співбесіда / інтерв'ю 60 хв	60	18

З аналізу видно, що у традиційному рекрутингу HR витрачає 15 хвилин на скринінг одного кандидата, тоді як у даній системі цей час становить лише 2 хвилини. Розрахуємо коефіцієнт підвищення ефективності роботи HR за формулою (1)

$$E_{HR} = \frac{t_{HR}^{trad}}{t_{HR}^{sys}}, \quad (1)$$

де E_{HR} – коефіцієнт підвищення ефективності роботи HR;

t_{HR}^{trad} – середній час, витрачений HR на скринінг одного кандидата в традиційному рекрутингу;

t_{HR}^{sys} – середній час, витрачений HR на скринінг одного кандидата в асинхронній системі.

Підставивши значення середнього часу, витраченого HR на скринінг одного кандидата в традиційному рекрутингу та використання запропонованої системи для асинхронного рекрутингу, отримаємо:

$$E_{HR} = \frac{15}{2} = 7,5.$$

Отже, використання інтелектуальної системи асинхронного рекрутингу знижує навантаження на HR у 7,5 разів у порівнянні з традиційним процесом. Це означає, що один рекрутер зможе обробити у п'ять разів більше кандидатів за однаковий проміжок часу, що безпосередньо впливає на загальну продуктивність відділу підбору персоналу.

Для опису залежності часу роботи технічного спеціаліста від тривалості відеоінтерв'ю доцільно використати лінійну модель. Це пов'язано з тим, що обсяг інформації у звіті зростає прямо пропорційно тривалості інтерв'ю: чим довше кандидат відповідає на запитання, тим більше змістових блоків з'являється у звіті, і тим довше технічний спеціаліст витрачає часу на ознайомлення з ними. Оскільки структура звіту стандартизована, збільшення навантаження відбувається поступово та рівномірно, що відображає лінійний характер процесу.

Таким чином, час роботи технічного спеціаліста описується функцією (2):

$$t_{Tech}^{sys}(L) = a + bL, \quad (2)$$

де $t_{Tech}^{sys}(L)$ – час, витрачений технічним спеціалістом у системі для інтерв'ю тривалістю L хвилин;

a – базовий час на ознайомлення зі звітом, незалежно від довжини інтерв'ю;

b – коефіцієнт, що показує, як збільшується час оцінки залежно від тривалості інтерв'ю;

L – тривалість відео-інтерв'ю, хвилин.

Підставивши експериментальні дані, формалізуємо часові залежності й порахуємо показники ефективності. Для технічних спеціалістів маємо три точки (10,3), (30,9), (60,18). Очевидно, що час у системі зростає пропорційно L , тому коефіцієнт b дорівнює:

$$b = \frac{t}{L} = \frac{3}{10} = 0,3.$$

Отже, лінійна модель часу для технічного спеціаліста у системі має вигляд (3)

$$t_{Tech}^{sys}(L) = 0,3L. \quad (3)$$

У традиційному підході технічний час для інтерв'ю довжини L дорівнює самій тривалості інтерв'ю (4):

$$t_{Tech}^{trad}(L) = L. \quad (4)$$

Коефіцієнт підвищення ефективності для технічного спеціаліста:

$$E_{Tech}(L) = \frac{t_{Tech}^{trad}(L)}{t_{Tech}^{sys}(L)} = \frac{L}{0,3L} = \frac{1}{0,3} \approx 3,33,$$

що свідчить про те що технічний спеціаліст у середньому працює приблизно у 3,33 рази ефективніше у системі відеоінтерв'ю.

Далі визначено загальний час на одного кандидата (HR + технік) у двох підходах (5-6):

$$T^{trad}(L) = t_{HR}^{trad} + t_{Tech}^{trad}(L) = 15 + L, \quad (5)$$

$$T^{sys}(L) = t_{HR}^{sys} + t_{Tech}^{sys}(L) = 2 + 0,3L. \quad (6)$$

Відсоткове скорочення загального часу (ефективність у %) визначається за формулою 7

$$\Delta(L) = \frac{T^{trad}(L) - T^{sys}(L)}{T^{trad}(L)} \cdot 100\% = \frac{13 + 0,7L}{15 + L} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Дана функція визначає, на скільки відсотків система скорочує загальні часові витрати порівняно з традиційним підходом. Так, підставивши типові L отримаємо відсоткове значення скорочення числових витрат:

При $L=10$:

$$T^{trad}(10) = 15 + 10 = 25,$$

$$T^{sys}(10) = 2 + 0,3 \cdot 10 = 5,$$

$$\Delta(10) = \frac{25-5}{25} \cdot 100\% = 80\%.$$

При $L=30$:

$$T^{trad}(30) = 45,$$

$$T^{sys}(30) = 2 + 0,3 \cdot 30 = 11,$$

$$\Delta(30) = \frac{45-11}{45} \cdot 100\% \approx 75,56\%.$$

При $L=60$:

$$T^{trad}(60) = 75,$$

$$T^{sys}(60) = 2 + 0,3 \cdot 60 = 20,$$

$$\Delta(60) = \frac{75-20}{75} \cdot 100\% \approx 73,33\%.$$

Розрахунок показує, що зі збільшенням тривалості відеоінтерв'ю відсоток скорочення загальних витрат

часу поступово зменшується. Це пояснюється тим, що внесок постійної складової (економія часу HR у 13 хвилин) стає менш значущим у порівнянні зі зростаючою часткою часу, витраченого технічним спеціалістом. Водночас швидкість зниження ефективності уповільнюється, що підтверджує наближення функції (9) до певної межі.

$$\Delta(L) = \frac{13+0,7L}{15+L} \cdot 100\% . \quad (9)$$

З математичної точки зору, при нескінченному зростанні тривалості інтерв'ю ($L \rightarrow \infty$) величина $\Delta(L)$ прагне до сталого значення:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \Delta(L) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{13 + 0,7L}{15 + L} \cdot 100\% = 0,7 \cdot 100\% = 70\%.$$

Отже, за песимістичним сценарієм, коли інтерв'ю є дуже довгим, система асинхронного рекрутингу забезпечує економію часу на рівні 70% в порівнянні з традиційним рекрутингом. Це означає, що навіть за максимальної тривалості процесу ефективність системи залишається високою та стабільною, що підтверджує доцільність її впровадження.

Висновок. Розроблена інтелектуальна система для асинхронного відео-інтерв'ю ефективно вирішує ключові проблеми сучасного рекрутингу. Вона успішно поєднує передові технології штучного інтелекту з практичними потребами HR-галузі, забезпечуючи об'єктивність, швидкість та зручність процесу відбору кандидатів. Інтелектуальна система реалізує комплексний підхід до оцінювання кандидатів через поєднання аналізу відповідей за допомогою GPT-4o та розпізнавання емоційного стану з використанням оптимізованої моделі DeepFace, що забезпечує формування цілісного профілю кандидата, враховуючи як професійні знання, так і психологічні характеристики. Розроблена інтелектуальна система має значний потенціал для подальшого розвитку. Високі показники точності як в розпізнаванні емоцій, так і в оцінюванні текстових відповідей, створюють міцну основу для розширення функціональності. Можливі напрямки вдосконалення включають інтеграцію з існуючими HR-системами, розширення підтримки різних мов, впровадження додаткових аналітичних метрик та розробку предиктивних моделей для прогнозування успішності кандидатів на конкретних посадах. Отримані результати підтверджують, що поєднання асинхронного формату співбесід з інтелектуальними методами аналізу є перспективним напрямком трансформації рекрутингових процесів. Інтелектуальна система не лише оптимізує витрати часу і ресурсів компаній, але й підвищує об'єктивність та якість кадрових рішень, що в кінцевому підсумку сприяє формуванню ефективніших команд та покращенню бізнес-результатів організацій.

References

1. Basch J. M., Melchers K. G. The use of video technology in personnel selection: A review. *International Journal of*
2. Hemamou L., Felhi G., Vandenbussche V. та ін. HireNet: A Hierarchical Attention Model for the Automatic Analysis of Asynchronous Video Job Interviews. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 33. No. 01. P. 573-581. DOI: 10.1609/aaai.v33i01.3301573.
3. Mahnaz Behroozi, Chris Parnin, Chris Brown. Asynchronous technical interviews: reducing the effect of supervised think-aloud on communication ability. : *Proceedings of the 30th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*. 2022. Pages 294 305. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3540250.3549168>
4. Pyle C., Roemmich K., Andalibi N. U.S. Job-Seekers' Organizational Justice Perceptions of Emotion AI-Enabled Interviews. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*. 2024. Vol. 8, No. CSCW2. Article 454, 42 p. DOI: 10.1145/3686993.
5. Evans Uhunoma. (2023). Facial Recognition Technology and Racial Discrimination a Study on the Design of On-Demand-Asynchronous Video Interview Solutions Used in Recruitment. *International Journal Of Multidisciplinary Research And Analysis*, 06(07), 3240–3258. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8186369>
6. Suen, H. Y., & Hung, K. E. (2024). Revealing the influence of AI and its interfaces on job candidates' honest and deceptive impression management in asynchronous video interviews. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 123011. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123011>
7. Brown T., Mann B., Ryder N. та ін. Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 1877-1901. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/file/1457c0d6bfbcb4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf> (дата звернення: 03.08.2025)
8. Serengil S. I., Ozpinar A. LightFace: A Hybrid Deep Face Recognition Framework. *2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*. 2020. P. 1-5. DOI: 10.1109/ASYU50717.2020.9259802.
9. Nithya D. M., Rakshith N. J., Rohan K. U., Sneha C. R., Vimala Devi R. Automatic Personality Recognition Used In Asynchronous Video Interviews. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*. 2022. C. 586–592. DOI: 10.48175/ijarsct-5076. – Доступ: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-5076>
10. Lumsden, Karen. 2022. *How to Conduct Asynchronous Interviews*. London: SAGE Publications, Ltd. <https://methods.sagepub.com/how-to-guide/how-to-conduct-asynchronous-interviews>.
11. Woods S. A., Ahmed S., Nikolaou I. та ін. Personnel selection in the digital age: A review of validity and applicant reactions, and future research challenges. *European Journal of Work and Organizational Psychology*. 2020. Vol. 29. No. 1. P. 64-77. DOI: 10.1080/1359432X.2019.1681401.
12. Gorman C. A., Robinson J., Gamble J. S. An investigation into the validity of asynchronous web-based video employment interview ratings. *Consulting Psychology Journal: Practice and Research*. 2018. Vol. 70. No. 2. P. 129-146. DOI: 10.1037/cpb0000102.
13. Naim I., Tanveer M. I., Gildea D. та ін. Automated prediction and analysis of job interview performance: The role of what you say and how you say it. 2015 *11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition*. 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/FG.2015.7163127.
14. Rao S B, P., Agnihotri, M. and Babu Jayagopi, D. (2021) "Improving Asynchronous Interview Interaction with Follow-up Question Generation", *International Journal of*

- Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 6(5), pp. 79–89. doi: 10.9781/ijimai.2021.02.010.
15. Bhalerao, P. Asynchronous Architecture for Real-Time Interview Simulation: A Concurrent Processing Approach to AI-Driven Interviews. *Proceedings of the International Conference on Recent Advancements and Modernisations in Sustainable Intelligent Technologies and Applications (RAMSITA 2025)*. Atlantis Press, 2025. C. 599–610. DOI: 10.2991/978-94-6463-716-8_46.
 16. Rodríguez-Sánchez M. C., Montero-Navarro A., Gallego-Losada R. Artificial intelligence for human resources management: A bibliometric analysis. *Quality & Quantity*. 2021. Vol. 55. No. 6. P. 2279-2300. DOI: 10.1007/s11135-021-01120.

Надійшла (received) 05.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Мойсєєв Владислав Юрійович (Moiseiev Vladyslav) – здобувач кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: vladislavmojseev@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2384-2006>.

Лисенко Антон Олександрович (Lysenko Anton) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: anton.lysenko@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5588-8340>.

Шуба Ірина Володимирівна (Shuba Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: iryna.shuba@khpі.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3650-8506>.

Б. Ю. СКРИПКА, Д. Б. ЄЛЬЧАНІНОВ**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ПОЛІГРУПОВИХ КОНФЛІКТІВ ІНТЕРЕСІВ В СЕРЕДОВИЩІ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ МЕРЕЖІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ**

Якщо енергетичні ресурси представляють собою надмірну цінність для групи агентів розподіленої системи, то виникає логічне питання, яким чином провести ефективний розподіл ресурсів з метою задовольнити потреби кожного агента та виконати розподіл ощадливо, щоб не перевиснажити запаси? Подібна задача має не тривіальне рішення. Наша робота базується на таких моделях, що були досліджені будучи натхненними природними формами існування групових біологічних істот. Об'єктом дослідження є інтелектуальні розподілені системи. Предметом дослідження є процес самоорганізації інтелектуальних агентів у цілісну розподілену систему, що мають спільні інтереси та дослідження ефективних стратегій вирішення виникаючих конфліктних ситуацій між агентами. Актуальність даної роботи. Без енергетичних ресурсів неможливе існування того чи іншого біологічного виду на планеті, а одже баланс і розподіл енергії має ключове значення. Електроенергія зараз є дефіцитним ресурсом – питання про пріоритетність розподілу між різними групами агентів розподіленої мережі є задачею не тільки енергетиків, а і математиків та економістів. Вода, людські ресурси, механічні засоби спільного користування та інше – можуть виступати спірним або конфліктним ресурсом для декількох агентів, котрі потрібно вирішувати. Мета даної роботи проаналізувати та синтезувати актуальні знання за тематикою дослідження в нові підходи-стратегії організації інтелектуальних агентів розподілених систем та сформувати ідеї, гіпотези, спостереження та експериментально-отримані дані, методи та підходи вирішення конфліктних ситуацій між агентами у текстово-графічну технологію для подальшого формування математичної моделі. Основна ідея роботи. Полягає у формуванні нової методики-стратегії урегулювання полігрупових конфліктних ситуацій у розподілених системах, що потенційно дасть можливість до вивільнення і перенаправлення додаткових ресурсів на досягнення кінцевої мети. Використані методи. Науковий експеримент, аналіз та синтез, методи порівняння та аналогій, метод моделювання та прототипування, абстракція та конкретизація, спостереження. Отримані результати: проаналізовано та синтезовано наукові матеріали області даного дослідження в локанічні знання; проведено аналіз тактико-стратегічних прийомів вирішення конфліктних ситуацій в контексті мультиагентних систем; сформовано нові знання у вигляді текстово-графічної технології; розглянуто можливі постановки задачі на вербальному рівні для вирішення конфліктних ситуацій вирішення міжгрупового конфлікту на прикладі координації інтелектуальних агентів вовчої зграї. Отримала подальший розвиток. Концепція та сама ідея врегулювання конфліктних ситуацій на основі математичного апарату в задачах моделювання та оптимізації використання ресурсних показників в контексті полі групової взаємодії агентів розподіленої інтелектуальної мережі на прикладі організації вовчої зграї; концепція пошуку ефективного рішення N-вимірної дилеми в'язнів. Наукова новизна. У даній роботі запропоновано вирішувати N-вимірну дилему в'язнів із використанням алгоритмічної методики контрольованого полі-групового конфлікту на основі метаевристичного алгоритму ройового інтелекту зграї сірих вовків (GWO). Модель алгоритму зграї сірих вовків стало можливим перенести на N-вимірну постановку задачі про дилему в'язнів завдяки тому, що здатність діяти окремого агента-вовка, як незалежного індивіда та впливати на загальний результат кооперації вовків однієї зграї і є прототипом моделі гри, котру уособлює собою «N-вимірна дилема в'язнів». Таким чином, кожен агент-вовк здатен впливати на рівень ефективності прийняття рішень вожаком його зграї, котрий уособлює собою гравця «N-вимірної дилеми в'язнів», котрий намагається максимізувати свій (зграї) виграш на площині пошуку рішень. Практичне значення. Запропоновані методи, моделі та методики можна використовувати в прикладних задачах економічного розрахунку ефективності підприємств, у задачах математичного моделювання пошуку балансу та ефективного розподілу ресурсів, в задачах пошуку та виявлення і оточення динамічних цілей в N-вимірних середовищах досягаючи ефективного показника фітнес-функції навіть на багато-екстремальних оптимізаційних функціях, в задачах ощадливого розподілу та споживання ресурсів. Висновки. Було виконано визначені у меті завдання та створено текстово-графічну технологію для подальшого формування математичної моделі вирішення задачі полігрупового конфлікту мультиагентної системи.

Ключові слова: ройовий інтелект, обчислювальний інтелект, стратегії управління, розподілені системи, боротьба за ресурси, управління конфліктом, N-вимірна дилема в'язнів, дослідження операцій, мультиагентні системи, методи оптимізації, вербальні моделі.

B. SKRYPKA, D. YELCHANINOV**MODELS AND METHODS FOR CONTROLLING MULTI-GROUP CONFLICTS OF INTEREST IN A MULTI-AGENT NETWORK ENVIRONMENT OF A DISTRIBUTED SYSTEM OF INTELLIGENT AGENTS**

If energy resources represent an excessive value for a group of agents of a distributed system, then a logical question arises: how to effectively allocate resources in order to satisfy the needs of each agent and to distribute them sparingly so as not to overexhaust reserves? Such a problem has a non-trivial solution. Our work is based on such models that were studied, inspired by the natural form of existence of group biological beings. The object is intelligent distributed systems. The subject is the process of self-organization of intelligent agents into a holistic distributed system that has common interests and the study of effective strategies for resolving emerging conflict situations between agents. Relevance of the work. Without energy resources, the existence of a particular biological species on the planet is impossible, and therefore the balance and distribution of energy is of key importance. Electricity is currently a scarce resource – the question of the priority of distribution between different groups of agents of a distributed network is a task not only for energy engineers, but also for mathematicians and economists. Water, human resources, mechanical means of shared use, etc. can act as a controversial or conflicting resource for several agents that need to be resolved. The goal of this work is to analyze and synthesize current knowledge on the topic of research into new approaches-strategies for organizing intelligent agents of distributed systems and to form ideas, hypotheses, observations and experimentally obtained data, methods and approaches for resolving conflict situations between agents into text-graphic technology for further formation of a mathematical model. The main idea consists in forming a new methodology-strategy for resolving multi-group conflict situations in distributed systems, which will potentially allow for the release and redirection of additional resources to achieve the ultimate goal. Methods used. Scientific experiment, analysis and synthesis, methods of comparison and analogy, modeling and prototyping method, abstraction and concretization, observations. Results obtained: scientific materials in the area of this research were analyzed and synthesized into local knowledge; an analysis of tactical and strategic methods for resolving conflict situations in the context of multi-agent systems was conducted; new knowledge was formed in the form of text-graphic technology; possible problem statements were considered at the verbal level for resolving conflict situations and resolving intergroup conflict using the example of coordination of intelligent agents of a wolf pack. Further developed. The concept and the very idea of resolving conflict situations based on the mathematical apparatus in the problems of modeling and optimizing the use of resource indicators in the context of multi-group interaction of agents

© Б. Ю. Скрипка, Д. Б. Єльчанінов, 2025

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

of a distributed intelligent network using the example of organizing a wolf pack; the concept of finding an effective solution to the N-dimensional prisoner's dilemma. Scientific novelty. In this work, it is proposed to solve the N-dimensional prisoner's dilemma using the algorithmic method of controlled multi-group conflict based on the metaheuristic algorithm of the swarm intelligence of a pack of gray wolves (GWO). The algorithm model of a pack of gray wolves has become possible to transfer to the N-dimensional formulation of the prisoners' dilemma problem due to the fact that the ability of an individual wolf agent to act as an independent individual and influence the overall outcome of cooperation of wolves in one pack is the prototype of the game model, which is represented by the "N-dimensional prisoners dilemma". Thus, each wolf agent is able to influence the level of decision-making efficiency of the leader of his pack, who represents the player of the "N-dimensional prisoners' dilemma", who tries to maximize his (the pack's) gain on the solution search plane. Practical significance. The proposed methods, models and techniques can be used in applied problems of economic calculation of enterprise efficiency, in problems of mathematical modeling of finding balance and effective allocation of resources, in problems of searching and identifying and surrounding dynamic goals in N-dimensional environments, achieving an effective fitness function indicator even on multi-extreme optimization functions, in problems of economical allocation and consumption of resources. Conclusions. The tasks specified in the objective were fulfilled and a text-graphic technology was created for the further formation of a mathematical model for solving the problem of polygroup conflict of a multiagent system.

Keywords: swarm intelligence, computational intelligence, control strategies, distributed systems, resource competition, conflict management, N-dimensional prisoners dilemma, operations research, multi-agent systems, optimization methods, verbal models.

Вступ. В контексті даної роботи наша увага зосереджена на структурі та взаємодії вовчої зграї, що в математичному контексті представлено оптимізаційним алгоритмом зграї сірих вовків (GWO), де вовча зграя спільно взаємодіє задля досягнення єдиної мети. Пропонується ускладнити базову модель алгоритмічної поведінки агентів-вовків та об'єднати зусилля N-зграй в одній операційній зоні, що очевидно, може дати, як позитивні так і негативні реакційні наслідки в силу конфлікту між зграями за території, де вони будуть спільно полювати на здобич задля виживання. В той же час буде використано апаратний механізм прототипування для спрощення більш складної моделі окремого вовка з метою дослідження визначених окремих частин поведінкових реакцій вовчої зграї та як одиниці дослідження поняття конфлікту інтересів між N-групами вовків розподіленої мультиагентної мережі.

Мета даної роботи: проаналізувати та синтезувати актуальні знання за тематикою дослідження у знання про підходи-стратегії організації та побудови мультиагентних структур пов'язаних у розподілені системи; розглянути та описово представити особливості поведінки агентів вовчої зграї у вигляді алгоритму керування спільними інтересами і потребами вовків-агентів в контексті складної мультиагентної системи, що являють собою комплексну мультиагентну структуру або інтелектуальну розподілену систему на основі обчислювального інтелекту; розглянути існуючі математичні моделі вирішення мультигрупових конфліктних ситуацій між людьми та сформувати базові стратегії протидії виникаючим конфліктним ситуаціям між інтелектуальними агентами розподіленої системи; графічно представити модель координаційно-незалежних між собою зграй вовків, кожна з яких мають свої ресурси та змагаються за персональні здобутки на одній площині доступних рішень задля максимізації виграшу; на основі попередньо проаналізованих та синтезованих знань про математичні моделі та особливості організації мультиагентних систем, запропонувати ідею для розв'язання N-вимірного мультигрупового конфлікту типу «N-вимірна дилема в'язнів» із використанням нового підходу на основі ройового інтелекту, а конкретніше на основі метаверистичного алгоритму зграї сірих вовків (GWO).

Постановка проблематики задачі. Конфлікт інтересів, з точки зору математичного моделювання – є процесом змагання між N-групами агентів розподіленої системи за певний вид ресурсу або певну можливість-превілегію для окремого агента чи групи агентів такої системи над іншими учасниками. В контексті методів оптимізації перевага стратегії дії чи «кращий» показник окремого агента над іншим, визначається за рахунок числового показника, що обраховується в контексті математичної операції обчислення значення фітнес-функції на кожній алгоритмічній ітерації. Таким чином, ми маємо змогу аналітично оцінити вигоду того чи іншого агента-гравця складної економічної гри та максимізувати чи мінімізувати загальний показник ефективності взаємодії агентів єдиної мультиагентної системи.

Зазначимо, що в ідеальних умовах вся наявна енергія системи витрачається на потрібну роботу, але такі умови можна досягти лише в контексті лабораторного експерименту. В реалістичних же умовах, виникають супутні енергетичні втрати на той чи інший супутній фізичний процес чи на між-агентний конфлікт. За визначенням, будь-який конфлікт вимагає марнування енергетичних ресурсів на подолання перешкод суперника, що означає ще більшу витрату запасу енергії агента та зменшення кінцевої вигоди гравця N-вимірної гри і системи в цілому. Аналізуючи наукові матеріали [1-33], ми дійшли до гіпотези-висновку, що енергія конфлікту може бути використана не на змагання між собою, а на наближення загальної вигоди системи до максимального рівня шляхом розподілу завдань між окремими гравцями (зграями вовків в нашому випадку), що в кінцевому результаті може дати більший виграш всім гравцям, а отже і кінцевий розподіл ресурсів буде означати збільшення частки виграшу окремого гравця. Залишається визначити та зафіксувати правила такої гри, ціну одного ітераційного кроку гри та сформувати спеціальні стратегії вирішення конфліктів інтересів між N-агентами системи, та розглянути можливі сценарії дій у ситуаціях, коли окремі агенти не бажають направляти зусилля на досягнення спільної мети, а бажають загарбати усі ресурси одноосібно.

Також, висувається гіпотеза стосовно того, що описана ситуація ефективного розподілу та контролю за енергією конфлікту все ж можлива, а отже і стратегії-підходи для раціонального споживання ресурсів в

задачах математичного моделювання процесів суперництва N-агентів є сенс розглянути на предмет пошуку покращення-вдосконалення. Очевидно, що в разі успішного перенаправлення енергії на досягнення спільної мети та загальна кооперація розподіленої інтелектуальної мультиагентної системи, дасть нам змогу описати нову модель ошадливого розподілу та використання наявних ресурсів в певному контексті вирішуваної задачі математичного моделювання.

Описана проблематика є задачею не тривіальною навіть тому, що дія будь-якого з агентів системи впливає на інших агентів розташованих у даному просторі, а в силу динамічно-змінюваної обстановки, загальна координація агентів буде вимагати від нас і додаткових експериментів над чутливими налаштуваннями для генерації несуперечливої початкової точки старту. Зафіксуємо, що описана постановка проблеми не вимагає від нас пошуку точного рішення, а задовольняється умовою знаходження близького до оптимального рішення з урахуванням накладеної системи обмежень.

Поточний аналіз теоретичних матеріалів за тематикою дослідження. Джон Неш залишив багато наукових матеріалів в області теорії ігор та з пошуку оптимальних стратегій для гравців. З точки зору абстрактності, поставлена задача являє собою ускладнену модель вирішення «дилеми в'язнів», коли розглядається N-вимірний випадок, а кожен окремий гравець являє собою групу агентів, що направляють свої зусилля на свою локальну мету [1, с. 5].

Виникає дилема: яка з комбінацій гри буде вигадна для всіх гравців? А можливо такої комбінації зовсім не існує і краще об'єднати загальні зусилля для досягнення всіма групами агентів спільної мети, тут же питання, а як визначити спільну мету, коли кожна група агентів має свої вподобання, бажання, потреби і початкові енергетичні запаси? Задача не тривіальна, а для розуміння контексту та можливих напрямів руху у напрямку близького до оптимального рішення, першочергово розглянемо актуальні роботи послідовників Джона Неша, розглянемо класичну економічну задачу підприємства та фундаментальні роботи Елінора Остром про ефективне управління наявними ресурсами, роботи пов'язані із вирішенням зазначених задач іншими методами та практиками.

Розглядається класична економічна задача ефективного управління ресурсами підприємства. Ефективне управління підприємством є грою на пошук точки оптимуму або гра із перетягуванням повзунків в різні боки, де існує математична залежність між налаштуваннями різних параметрів системи балансу. Якщо таких повзунків умовно, менше 10 одиниць, то пошук оптимального балансу хоч і буде викликати деякі труднощі, але не надто, у порівнянні, коли конфігураційних налаштувань на підприємстві сотні. В такому випадку раціонально використовувати ефективні техніки оптимізації. У якості простого прикладу розглянемо спрощений процес виготовлення сталі, де виконується відсоткове змішування різних металевих включень для формування потрібного

хімічного складу та кристалічної решітки. Коли співвідношення збільшується чи зменшується у процентній частці сталі спеціальних компонент, як: молібден, кобальт, вольфрам, нікель та інші метали до загальної кристалічної решітки, то з'являється можливість регулювати твердість, в'язкість, крихкість та інші фізичні параметри продукції. Схожим чином формується і математична частина задачі, де вже проводиться розрахунок фітнес-функції у перерахунку на кількість доданих включень до ціни за умовну кількість речовини. Перенесемо спрощену математичну модель економіки підприємства на організацію вовчої зграї.

Розглядається модель економічного планування ефективного розподілу ресурсів з точки зору теорії ігор Джона Неша, як інструмента пошуку оптимальних стратегій та виявлення завідома програшних комбінацій ігор на прикладі вже вирішених задач. Класичною задачею виступає задача про «дилему в'язнів». Дана задача є такою моделлю, котра дасть нам уявлення про проблеми, котрі виникають в ході вирішення економічної задачі ефективного балансу оптимальних стратегій розподілу енергетичних ресурсів вовчої зграї.

У роботі [2] розглядаються оптимальні стратегії вирішення «дилеми в'язня» з новими схемами пошуку розв'язків на основі еволюційних комбінацій, а з іншого боку за посиланням [3] Рассел Дж. та Ксю К. наочно продемонстрували предметний приклад вирішення конфліктних ситуацій на основі теорії ігор між гравцями, котрі приймають рішення базуючись на адаптивних стратегіях відносно дій їх опонентів досягаючи таким чином загальної групової взаємодії на площині доступних рішень. В [4] розглядається сукупна інформація та нові погляди на класичну задачу про «дилему в'язня», котра представляє собою основу соціальної ієрархії будь-якого групового формування, яке має нерівності в соціальному статусі або має змагатися за певний вид ресурсу чи блага поміж іншими членами соціуму. В той же час матеріали [5], [6] демонструють стратегії розв'язання «дилеми в'язня» на основі дискретного часового процесу, в якому той чи інший гравець може припинити гру в будь-який час і тоді інший гравець має скоригувати свою стратегію. Робота [7] В. Жанга описує процес формування міжособистісних зв'язків та їх колективної кооперації з метою вирішення виникаючих конфліктів індивідуальних інтересів або вивчення ефективних стратегій взаємодії людей задля їх спільної взаємодії – це комплекс прийомів теорії ігор Джона Неша, а окремі математичні моделі, у даній роботі скомпоновано в методології, задля аналізу та кращого розуміння проблем соціальних процесів на прикладі китайського суспільства.

Природа певним чином навчилася вирішувати описані проблеми, тож звернемося до робіт, що були натхненні біологічними аспектами живої природи та в них були сформовані моделі використання мультиагентних систем у складі колективних формувань типу: зграя, рій, отара і т.п. Розглянемо

роботи про біологічні принципи формування колективного інтелекту.

Робота [8] описує еволюційні принципи та переваги взаємодії еволюційно-слабких агентів у спільні групи, над окремими сильними агентами. У роботі висвітлюється той факт, що хоч і слабкі агенти відповідно до теорії еволюції Дарвіна мали б вимерти, виживають і переважають сильних агентів у прямому зіткненні завдяки стратегії формування соціуму та внутрішній координації окремих примітивів ройової структури. А. Зольнокі та М. Перс показали, що використовуючи дану математичну модель для вирішення «дилеми в'язнів», можна побудувати ефективну мультипоточну схему взаємодії міжгрупової соціальної кооперації груп слабких агентів. У [9] М. Квон із колегами за допомогою алгоритмів генерації штучного хаосу та непередбачуваної еволюції на відрізку неперервного часу презентують переваги та недоліки міжагентної взаємодії, виходячи суто із раціональних показників та вибору вигравшій стратегій, що формуються на принципах вирішення задачі про «дилему в'язнів».

У роботі [10] Є. Бабенко представлено моделі метаверистичної оптимізації: представлено інформаційну технологію аналізу біологічних процесів. Результати її роботи протестовано на класичних оптимізаційних проблемах, як подорожуючого торговця, складання рюкзака та інших проблемах, так і на класичних оптимізаційних функціях. Серед важливих результатів даної роботи, відзначено, що дослідження принципів формування та самоорганізації мультиагентних розподілених систем широко застосовуються для математичного моделювання, симуляції рекомендаційних та роботизованих систем. Тут же, в [10] зазначено недоліки використання такого підходу.

В контексті математичного моделювання логічним питанням постає, як визначити та яким потрібен бути рівень інтелектуальності у штучного агента інтелектуальної мультиагентної системи? У роботі [11], проводиться аналіз інформації та доводів стосовно того, наскільки мають бути «інтелектуальними» агенти в залежності від постановки задачі до математичного моделювання чи симуляції тої чи іншої форми мультиагентної моделі розподіленої системи на прикладі моделі полювання вовків на стадо овець. Робота базується і на стратегіях пов'язаних із «дилемою в'язнів». Для порівняння, робота [12] розглядає еволюційний підхід генетичного алгоритму для вирішення «дилеми в'язнів» на противагу до полювання зграєю вовків на стадо.

Маючи загальне уявлення про теорію ігор Джона Неша, розуміємо, що досягнення оптимального результату на площині дійсних локальних рішень потребує математичних розрахунків та поєднання системи накладання обмежень на матрицю варіативностей можливих дій гравців. Комбінація теорії Неша та математичні моделі оптимізаційних алгоритмів, котрими були натхнені дослідники природи – дають нам можливість симулювати складну алгоритмічну поведінкову форму, як рій чи зграя,

колонія тощо, на основі елементарних правил пересування та виконання дій чи перевірки стану агента. Нам відомо, що така форма існування окремих агентів «сам на сам» – в природі неможлива в силу їх слабкості до агресивного середовища, але їх колективна самоорганізація і є прикладом вирішення елементарних конфліктних ситуацій на рівні «потрібно вижити» та поєднати загальні зусилля задля досягнення спільної мети. Еленор Остром – Лауреат Нобелівської премії в області економіки, має наукові публікації, що слід звернути увагу для формування коректного світобачення на принципи організації соціальних структур типу мультиагентна система, яка є розподіленою інтелектуальною системою з агентами різного типу. Важливо розуміти стратегії та принципи прийняття рішень на шляху до пошуку ефективних рішень засобами мультиагентних систем.

Економічна теорія ефективного планування та використання ресурсів Еленор Остром отримала всесвітнє визнання та Нобелівську відзнаку за напрямок досліджень в економіці за фундаментальні істини. У роботі [13] Е. Остром та іншими розглядається типовий випадок, коли спільні пасовища чи ресурси використовуються безконтрольно, що призводить до надмірного виснаження та надмірного споживання. Натомість, автори зазначають, що було б ефективніше споживати ресурси ощадливо та керуватися колективними інтересами на основі спеціальних правил, беручи до уваги потреби інших агентів-гравців. Автори додають, що без спеціального агента-регулятора виконання правил користування спільним ресурсом буде майже неможливо, як і досягти точки оптимуму розподілу для повільно-відновлюваного обмеженого ресурсу.

У роботі [14] наводиться приклад різних типів агентів та механізмів врегулювання конфліктів, в [15] розглядаються складні моделі економічних систем, а у [16] наводяться ефективні прийоми організації агентів та звертається увага на загальні екологічні проблеми планети. В той час як у [17] досліджено соціальні моделі та взаємодію людей, у роботі [18] обговорюється обмежена кількість ресурсів системи та проблеми навколо дилеми «басейн ресурсів», та як ефективно провести масштабування і користування ресурсами на міжнародному рівні.

У фундаментальній роботі [19] Е. Остром наводиться низка прикладів про те, як користуватися спільними ресурсами разом на довірі та самоуправлінні без надмірного споживання багатьма агентами системи, базуючись на узгоджених діях без поняття приватизації та права власності на ресурси.

Мультиагентний підхід базується на окремих алгоритмах, що варто розглянути в контексті оптимізаційних та економічних задач ефективного планування розподілу та використання енергетичних ресурсів.

Розглядається область знань про обчислювальний інтелект, конкретніше – ройовий інтелект. Зосередимо свою увагу на евристичному алгоритмі зграї сірих вовків, котрий зарекомендував себе алгоритмом, що швидко і адаптивно підлаштовується до змін, а його

специфічні модифікації, що застосовуються залежно від постановки задачі, ефективно вирішують цілий спектр поставлених інженерно-практичних задач.

У роботі [20] розглядається приклад економічно-оптимізаційної задачі із накладеною системою обмежень під час пошуку оптимального балансу орендного житла. У роботі [21], Северин В. П., Нікуліна О. М. та інші, дослідили методи обчислювального інтелекту на предмет підвищення рівня їх адаптивності, точності, ефективності у вирішенні складних оптимізаційних задач, а за посиланням [22] проведено аналіз останніх наукових підходів в області мінімізації ризиків оптимізації моделі бізнес-процесів розподіленої системи управління. У роботі присутні концептуальні графічні нариси моделей інтелектуальних агентів ройового інтелекту, зокрема вовчої зграї.

За посиланням [23], Гринченко М. А. представила матеріал із підходами вирішення конфліктних ситуацій на проєктах між людьми. Зазначається, що конфліктні ситуації виникали між взаємодіючими агентами у зоні перетину діяльності або в зоні інтересу за певні матеріальні інтереси, в момент з'ясування соціального статусу агента, суперництво за виконання схожих завдань на спільній площині локальних рішень.

У роботі [24] наводиться приклад вирішення задачі розподілення енергетичних ресурсів системи оптимальним способом із використанням алгоритму зграї сірих вовків. В [25] описано мультистратегії застосування алгоритму зграї сірих вовків для пошуку глобального рішення у застосуванні до інженерних задач, а у [26] наводиться покращений варіант алгоритму зграї сірих вовків (Multi-group grey wolf optimizer – MIGWO) із використанням адаптивних вагових коефіцієнтів та прийому просторового навчання для пошуку глобального рішення на прикладі мульти-ройової взаємодії незалежних підгруп, як це відбувається в алгоритмі рою часток (Particle swarm optimizer – PSO). З іншого боку вченими у [27] розглянуто нову модифікацію рішення на основі комбінації підходів пошуку глобального та локальних рішень таких, як: CG (Chaotic game), GB (Gaussian barebone) та RS (random selection), а у фінальному варіанті така алгоритмічна сукупність представлена індексом CBRGWO. У матеріалі [28] розглядається детально підхід комбінованої еволюції двох евристичних алгоритмів ройового інтелекту – рою часток та зграї сірих вовків, а їм на противагу у [29] науковцями запропоновано оптимізаційна мульти-стратегія на основі модифікації алгоритму зграї сірих вовків із випадковим напрямом руху, визначенням напрямку локального пошуку та формуванням підгруп із різними пороговими значеннями фітнес-функції.

У роботі [30] розглянуто модель фреймворку для планування надзвичайних ситуацій із застосуванням безпілотних літаючих апаратів, особливостями роботи є визначення оптимальних розмірів флоту рятувальної місії, мінімізація витрат на місію та часу постановки задач до виконання за рахунок впровадження модифікаційних рішень на основі алгоритму зграї сірих вовків (GWO), а робота [31] зосереджена на тому, як

ввести систему обмежень під час планування оптимізаційного процесу на прикладі алгоритму ройового інтелекту рою часток (PSO), що може бути ефективно використано у реалізації модифікаційних рішень на основі алгоритму зграї сірих вовків, також.

Результати дослідження. В контексті даного дослідження розглядається оптимізаційне управління мультигруповою поведінкою інтелектуальних розподілених систем на прикладі організації мультигрупової поведінки зграї сірих вовків з перенесенням проєкції соціальної структури людей на ієрархію вовків. Планується застосовувати прийом моделювання та зафіксуємо той факт, що будь-яке виконуваче агентом завдання – є пошуком локального рішення на шляху до досягнення спільної мети, що ми називатимемо глобальним рішенням або близьким до такого одне із локальних рішень, яке задовольняє встановленим критеріям зупинки ітераційного оптимізаційного процесу.

Моделюється задача оптимізаційного управління мультигруповою поведінкою агентів в контексті розподіленої інтелектуальної системи на основі алгоритму зграї сірих вовків (GWO). Розглядається випадок, де інтелектуальна складова такої системи базується на обчислювальному інтелекті: правилах природної еволюції і алгоритмах ройового інтелекту. Досліджується та аналізується проблематика моделювання алгоритму зграї вовків з метою подальшого розвитку ідеї алгоритмічного відтворення тактико-стратегічних механізмів групових видів в розподілених інтелектуальних системах із використанням мультигрупового підходу та ефективним вирішенням конфліктних ситуацій.

Розглянемо характерні причини міжвидових конфліктів інтересів. У природі, міжгруповий конфлікт інтересів поміж зграй вовків найчастіше виникає навколо обмежених ресурсів: їжа, вода, території, котрі є енергетичними джерелами або ареалом для полювання зграї. Зафіксуємо поняття «енергія конфлікту» – це ресурси (основним ресурсом для моделі вовчої зграї є харчові калорії та вода), що змарновано із негативними наслідками та негативним результатом на загальний енергетичний баланс розподіленої системи, що моделюється, і такі ресурси, що були витрачені на міжвидову боротьбу агентів за незначну частку вигоди чи взагалі її відсутність в результаті завершення активної фази вирішення міжгрупового конфлікту інтересів.

Розглянемо поняття «комбінована кругова діаграма оцінки міжгрупових конфліктних інтересів», далі в роботі для зручності будемо використовувати скорочення повної назви до «діаграма конфліктів». Візуалізацію діаграми конфліктів продемонстровано на рис. 1. Діаграма-рисунок відображає N-груп (в даному випадку зграй вовків) інтелектуальних агентів, кожна з яких включає від одного агента, використаємо діаграму конфліктів для графічного моделювання мультиагентних зв'язків. Дане поняття-діаграма уособлює в собі діаграму кругових елементів, котрі зображені у вигляді кругового об'єкта. Діаграма,

зображена на рис. 1, графічно демонструє кількість зв'язків між зграями вовків та дає можливість провести оцінку кількості наявних конфліктів інтересів між зграями, шляхом підрахунку числа попарних перетинів відповідних кругових об'єктів.

Важливо зазначити те, що пропонується використовувати пропорційний розмір кругового об'єкта до запасів його ресурсів, що в процесі моделювання виражається початково-заданим числовим показником-характеристикою окремого агента вовка та акумулюється в загальну суму для всієї зграї.

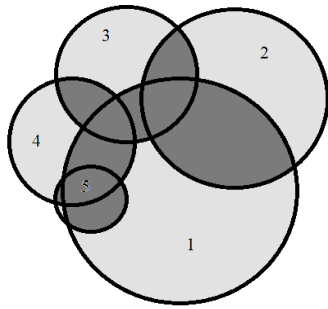


Рис. 1. Діаграма конфліктів. Приклад складної діаграми міжгрупового конфлікту інтересів окремих зграй вовків

Розглядаючи рис. 1, бачимо, що окрім відмінних розмірів кругових об'єктів, присутні різні площі попарного перетину між деякими із них. Згідно поняття діаграми конфліктів, більша чи менша площа попарного перетину об'єктів, пояснюється відповідним числовим показником, що розраховується, як число для оптимізаційної фітнес функції, котру ми маємо на меті звести до мінімуму, що буде означати відсутність конфлікту тої чи іншої зграї з іншою за ресурси. Пропонується використовувати шкалу для «показника конфліктності», у вигляді числового значення у формі десяткового числа, котре лежить на проміжку від 0 до 1 та включає крайні значення, де 0 означає відсутність будь-яких конфліктів за спільні ресурси чи інтереси, 1 – це повне співпадіння конфліктних інтересів та необхідність пошуку стратегії вирішення конфлікту зграй, а число на проміжку більше 0 і менше 1 – це часткове співпадіння інтересів зграй. У відповідності до розміру початкових енергетичних ресурсів однієї зграї та іншої, що конфліктують, і буде залежати обрана стратегія вирішення конфлікту окремим інтелектуальним модулем на основі теорії прийняття рішень. Варто зазначити, що комплексні випадки множинного попарного перетину на діаграмі конфліктів інтересів потрібно вирішувати поступово і відслідковувати циклічності в процесі моделювання за допомогою матриці відстаней між центрами інтересів зграй. На даному етапі дослідження пропонується проводити поетапні оцінювання задля не допущення спотворення вхідних даних, жертвуючи швидкістю паралельного опрацювання вхідної інформації. Очевидно, що для аналітичної оцінки людиною число 0.74 або 0.7345 буде означати два дуже близьких по значенню числа, але в контексті вирішуваної задачі, такі числа можуть кардинально впливати на загальну стратегію

оптимізаційного процесу, особливо у випадку складання залишкових часток для коректного прийняття рішення, яку саме стратегію вирішення конфлікту обрати. Наведемо уявний приклад-представлення у вигляді вербальної моделі із переводом у шкалу, зрозумілу людині, як буде виглядати кінцевий висновок аналізу інтелектуальним модулем отриманих даних з діаграми конфліктів, замість числових показників: конфлікт відсутній, сторони знайшли шляхи вирішення конфлікту, конфліктують та витрачають енергетичні ресурси не ефективно, пристосувалися один до одного тощо. Питання: як зручно представити набір інтересів кожного з агентів-вовків – у вигляді одинарного вектора-матриці, для мінімізації використання пам'яті та покоміркового налаштування початкової точки мультиагентної системи.

Розглянемо діаграму конфліктів з точки зору методів оптимізації. На області визначення знаходяться N-зграй (груп) вовків, інтереси кожної з груп та їх конфлікт-перетин інтересів у вигляді поелементних перетинів кругових елементів діаграми зображено на рис. 1. Розглянемо рис. 1 для аналізу наявних на ній зон конфлікту інтересів. Початкова точка була сформована експериментально підбором параметрів-налаштувань. Система обмежень підібрана так, щоб зграя вовків пересувалася в межах визначеного ареалу проживання, а кількість здобичі розміщено неоднорідно. Ареали проживання агентів динамічно-змінювані зі встановленими швидкостями.

Діаграма конфліктів з точки зору складної економічної гри на виживання, де описана початкова точка, налічує N-зграй вовків, котрі в даному контексті виступають «гравцями», та окремі види травоядних тварин: зайці, дикі кози, олені – має на меті пошук методів кооперації зграй вовків задля досягнення спільної мети та ощадливого користування енергетичними ресурсами, котрі мають можливість закінчуватися з однією швидкістю та відновлюватися з меншою чи більшою швидкістю в залежності від ареалу проживання та кількості загроз для них [19]. З точки зору економіки підприємства – оптимізаційна фітнес-функція доповнюється пошуком балансованого стану «споживання-відновлення» енергетичних ресурсів. З точки ж зору теорії ігор, зафіксуємо те, що в нашому випадку окремий гравець, котрий виступає у пошуках вигірної комбінації є групою вовків (зграєю), а окремий вовк – інтелектуальним агентом розподіленої системи. Описана сукупна модель є K-вимірним прикладом задачі типу «дилема в'язнів», де ми маємо K-вимірність у тому розумінні, що кожному гравцю такої гри доступно по L доступних стратегій дій, котрі можуть бути розширені чи звужені в ході процесу навчання інтелектуального модуля на динамічно-змінюваних даних [32-33].

Описана модель являє собою складну мультиагентну розподілену інтелектуальну систему, що направлена на ефективне вирішення конфліктних мультиагентних ситуацій. Також, запропонована модель на основі N-вимірної задачі про дилему в'язнів на основі ройового алгоритму зграї сірих вовків є

новим підходом до вирішення, як для самої N-вимірної задачі дилеми про в'язнів, так і універсальною стратегією пошуку вигравшних стратегій для різних типів вирішуваних задач.

Для простоти демонстрації представленої ідеї оптимізаційної моделі, що є комбінацією методів оптимізації, теорії ігор, економіки підприємства та ройового інтелекту – розглянемо одну із окремих ітерацій загального оптимізаційного процесу вирішення конфлікту енергетичних інтересів зграї вовків на діаграмі конфліктів, що зображена на рис. 2.

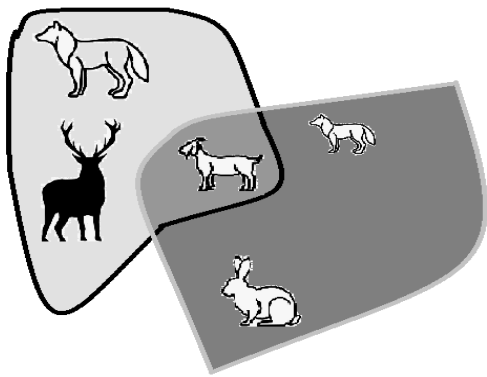


Рис. 2. Конфлікт інтересів між зграями вовків за ресурси

На рис. 2 можна побачити, що два окремих ареали проживання вовчих зграй (вони ж гравці економічної задачі моделювання підприємства на виживання) співіснують на спільній території та мають ненульову площу перетину зон їх ареалів проживання. Відповідно до поняття про діаграму конфліктів та області допустимих значень для цифрового показника, розуміємо, що ненульова площа перетину на діаграмі конфліктів, означає наявність невирішеного конфлікту за енергетичні ресурси. Групи вовків, котрі кожна можуть діяти абсолютно по-різному та реагувати, так само відмінно на входні сигнали, мають свої потреби, що було задано конфігураційно із початковою точкою. Проаналізуємо дану ситуацію та опишемо можливі стратегії вирішення оптимізаційної задачі, що в даному випадку вирішується словесно.

Завдання – пошук оптимальних або прийнятних розв'язків на площині доступних рішень шляхом ефективного розподілу та збалансованого користування енергетичними ресурсами між зграями вовків і їх окремими агентами розподіленої системи із використанням адаптивних стратегій вирішення конфліктів інтересів.

Оптимізаційна функція визначається мінімізацією конфліктних ситуацій за ареал проживання і ресурси харчування, пошук мінімального енергетичного балансу між учасниками мультиагентної системи, що означає зменшення площі попарного перетину між зграями вовків за умови, що їх спільна діяльність не покращує загальний результат у вигляді взаємодопомоги. Описана модель оптимізаційної задачі є складною, а сама постановка є багатокритеріальною оптимізаційною задачею. Для словесного вирішення поставленої задачі

використовуються методи: порівняння та аналогій, аналізу та синтезу, спланований експеримент.

Пошук ефективної стратегії самоорганізації та взаємодії між групами-зграями вовків: розглядається ідея алгоритмічної самоорганізації зграй вовків, коли дві або більше координаційно незалежних зграй вовків, що мають кожна свої інтереси та ненульову площу перетину в зоні конфліктів інтересів, виконують спільне завдання ефективно вирішивши конфлікт інтересів. В контексті моделювання, з одного боку представлена модель є суперечливою за визначенням, а з іншого як модель-прототип має право на існування для створення роботизованих чи безпілотних автономних груп пошуку та порятунку в надзвичайних ситуаціях, під час розподіленої координації загонів. Однією з ефективних стратегій в такій ситуації може виступати спостереження за складом та оцінка кількості за розміром зграї супротивника, з метою проведення аналітичної оцінки вірогідності успішності прямого зіткнення-конфлікту чи необхідність пошуку обхідних шляхів поодинокого оточення окремих агентів іншої зграї, пошуку можливості ефективних «переговорів» в контексті комп'ютерного моделювання з метою ефективного використання усіх наявних ресурсів зграй. У той же час потрібно розуміти, що протилежна до мирного врегулювання та спільної координації – є стратегія «прямого зіткнення зграй для з'ясування переваги силою» між такими, як це в природі часто буває під час з'ясування права на полювання на певній території хижаками. Така стратегія вимагає витрати харчових ресурсів зграй не на спільне полювання, а в більшій мірі на міжвидову ворожнечу поміж «зграями вовків», що ми називаємо «без цільове марнування ресурсів». В ході вирішення конфлікту за методом зіткнення в результаті буде з'ясовано одноосібну зграю-переможця, але ця зграя зазнає значних втрат ресурсів, як серед агентів, так і серед харчових. Здобутки ж при виборі такої стратегії можуть бути меншими, ніж вона першочергово це очікувала, чи за ті, що вона мала до початку конфліктної ситуації.

Аналізуючи та досліджуючи описані стратегії вирішення конфліктних ситуацій між незалежними зграями, вірною виступає стратегія відсутності прямого «зіткнення», яка в кінцевому результаті дасть зграям змогу не тільки збільшити рекреаційний потенціал для відновлення популяції травоядних, а і зграї зможуть полювати на більшу кількість видів тварин одночасно, маючи в своєму запасі, як більше харчових ресурсів, так і підвищену вірогідність успішного відбиття атаки від інших зграй за рахунок згуртованості із іншою зграєю (рис. 2).

Розглядається наступна найпростіша постановка задачі моделювання, коли дві координаційно незалежні групи вовків, що полюють на одній території одночасно – конфліктують за здобич. Кожну зграю направляє свій вожак, але здобич – одна на дві зграї, що і є причиною конфлікту. У природніх умовах спільна здобич на полюванні визвала би суперечку, але в контексті комп'ютерного моделювання постають цікаві гіпотези, ідеї, котрі мають право на існування.

Пропонується ідея модифікації моделювання поведінки алгоритму зграї сірих вовків, коли вовки, в межах своєї зграї діють як незалежні інтелектуальні агенти, та мають видові характеристики та здібності, як розподілений обмін інформацією. Це означає, що дві незалежні зграї вовків можуть одночасно виконувати пошук стратегії успіху полювання на здобич паралельно та розподілено обмінюватися інформацією між суміжними агентами незалежних зграй в реальному часі. Дане поняття представляє собою механізми різнобічної синхронізації та обміну інформацією між агентами розподіленої системи, їх покращену адаптацію за рахунок міжагентного обміну інформацією на місцевості в режимі реального часу та можливості паралельно виконувати поставлені задачі.

Для розрахунку продуктивності окремого агента-вовка, пропонується використовувати окремий якісно-числовий показник, котрий обчислюється в залежності від контекстно-залежних параметрів-характеристик та налаштувань системи.

Алгоритмічно дане поняття «контрольованого конфлікту інтересів» можна представити, як процес або алгоритмічний механізм, коли мультиагентна розподілена взаємодія направлена на виконання спільної задачі, як це показано на рис. 3.

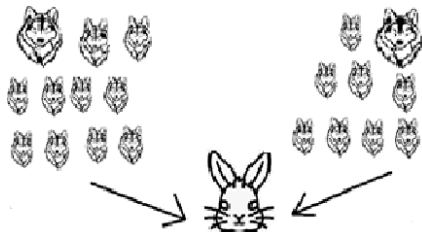


Рис. 3. Контрольований полігруповий мультиагентний конфлікт інтересів зграй вовків під час полювання на здобич

У спланованих тестових експериментах із моделювання контрольованого конфлікту інтересів підтверджено, що такий механізм моделювання дозволяє нам відтворити описаний підхід в силу спрощеності моделі агента-вовка та накладання К-розмірної кількості ігрових стратегій окремої зграї на динамічну обстановку зграй вовків, котрі можуть одночасно «полювати». В ході аналізу складностей та специфіки поставленої задачі оптимізаційного управління, нами було проаналізовано переваги і недоліки використання евристичного алгоритму ройового інтелекту класу стохастичної оптимізації типу зграї сірих вовків (GWO) на окремих задачах вирішення складних практичних проблем із використанням мультигрупового підходу комп'ютерного моделювання для ефективного розподілу поставлених групам задач. Під час формування інформаційної моделі, ми визначили, що можна ефективно відокремити і розподілити завдання з розвідки місцевості, інтелектуального пошуку та розпізнавання цілей, пошуку вразливих місць здобичі та вичікування вдалого моменту для полювання, оточення і полювання на здобич, колізії, механізм організації обчислень – на незалежні завдання. Перелічені вище завдання група інтелектуальних

агентів здатна виконувати одночасно (паралельно) або послідовно (синхронно або асинхронно), в залежності від конфігураційно-заданих параметрів із налаштуваннями або в залежності від вибору конфліктно-узгодженого ступеня самоорганізації комп'ютерної моделі вовчих зграй.

Так як, описана інформаційно-поведінкова модель вовчої зграї – це абстракція-проекція і перенесення тактик та стратегій поведінки вовків під час полювання у природі світ комп'ютерного моделювання, то дана модель може бути використана під час вирішення актуальної для України та світу, задачі ефективного розподілу і користування обмеженими енергетичними ресурсами. Доведемо актуальність та практичну значимість описаної моделі на прикладній постановці задачі ефективного управління підприємствами генерації електроенергії. В даному контексті «вовчі зграї (рис. 3)» – це користувачі електромереж, їм необхідна енергія для виживання в економічному (господарчі підприємства, громадяни) та фізичному (лікарні з пацієнтами) сенсі тощо, «популяція травоядних тварин (рис. 3)» – це саме генеруючі потужності електроенергії, котрі в свою чергу споживають паливну та відновлювану ресурсу бази, що є вугіллям, ураном, нафтопродуктами, вітрова енергія, енергія сонця, гідроенергія тощо (в контексті описуваної моделі вовчої зграї – це природна кормова база травоядних).

За умови ефективного перетворення одного виду ресурсу в інший маємо змогу налагодити ефективну мультиагентну кооперацію, а отже і можливість балансувати ділянки розірваної системи електропостачання. Зазначимо, що пошук стану балансу можливий за умови раціонального користування паливно-відновлюваної ресурсної бази на генеруючих потужностях та ощадливого користування кінцевими споживачами електроенергії, так як сильні та часті коливання співвідношення «генерація-споживання», вимагають постійного пошуку нової точки оптимального рішення. В силу того, що запаси паливних ресурсів в умовах географічного розташування окремих держав можуть бути малими або логістичні шляхи постачання надто довгими – це призведе до необхідності вирішення виникаючих конфліктних ситуацій за паливні ресурси для генеруючих потужностей всередині одного виду агентів (модель: зграя вовків на полюванні). Виникає додаткова задача-проблема, котра має бути ефективно вирішена із використанням вигравшних стратегій та накладенням обмеження у вигляді пріоритетності подачі ресурсу для тої чи іншої зграї вовків чи визначеного агента-вовка (лікарня, транспортна інфраструктура, опалювальні мережі тощо). Описана графічна модель представлена на рис. 1-2.

Як інший приклад практичної значимості, описана модель може виступати в контексті ефективного розподілу наявних ресурсів між об'єднаними L-зграями вовків на шляху до спільної мети для відбиття загрози з боку зграї інших вовків, що намагається витратити ресурси не ефективно на міжвидовий

конфлікт, в протиставленні ефективному – пошук балансу ресурсної системи між зграями.

Не вирішені в ході дослідження завдання. В ході даного дослідження нами не було вирішено задачу комп'ютерного програмування описаних стратегій та методів мультиагентних конфліктів інтересів; не вирішено завдання розробки мультипоточних та розподілених алгоритмів для запропонованих моделей та методів; не вирішено завдання автоматизації відображення графічним способом діаграми конфліктів інтересів; не вирішено завдання знаходження площі перетину конфліктів інтересів графічним способом в реальному часі; не вирішено завдання автоматизованого процесу комп'ютерної симуляції оптимізаційного процесу ефективного вирішення конфліктних ситуацій між агентами за ресурси; не розроблено математичну модель оптимізаційного процесу вирішення прикладної задачі математики на основі отриманої інформаційно-текстової та графічної технології.

Перспективи розвитку роботи. Використовуючи отримані в даному дослідженні результати, нами у майбутньому планується розвинути теоретичну та практичні частини, а за можливості реалізувати відповідні математичні та комп'ютерні моделі, котрі стосуються графічних методів та візуалізації оптимізаційного процесу на основі запропонованих моделей та методів, стратегій контролю полігрупових конфліктів інтересів у розподілених мультиагентних системах.

Висновки. У роботі отримало подальший розвиток поняття моделювання аспектів «контрольованого полігрупового мультиагентного конфлікту інтересів», як тактико-стратегічного прийому у цілісному оптимізаційному процесі комп'ютерного моделювання вовчої зграї на площині пошуку рішення із застосуванням ощадливого механізму регуляції споживання доступних ресурсів та пошуку ефективних стратегій дій на основі «К-вимірної задачі дилеми в'язнів».

Було запропоновано чи вдосконалено існуючі моделі та методи, підходи і стратегії дій, а відповідні знання було сформовано у вигляді інформаційно-текстової технології. Також, у даній роботі запропоновано окремі тактико-стратегічні поведінкові прийоми в тих чи інших конфліктних ситуаціях та шляхи їх вирішення, а для кращого розуміння та наочності демонстрації ідеї – додано окремі графічні матеріали: рисунки та діаграми.

Було розглянуто модель поведінки декількох груп-зграй вовків із описанням механізму параметрично-контрольованої конкуренції між ними в контексті єдиного процесу полювання.

У задачі економіки підприємства на виживання використано розширення поняття про комбіновану кругову діаграму оцінки міжгрупових конфліктних інтересів задля якісно-кількісної оцінки показників ефективності оптимізаційних процесів, котрі подано у

якості ідеї розрахунку продуктивності окремого агента-вовка із використанням якісно-числового показника.

У роботі проаналізовано та синтезовано наукові матеріали області даного дослідження в локанічні знання для їх поетапного перебору та пошуку місць для покращення роботи вже відомих алгоритмів прикладного застосування, застосовуючи алгоритм зграї сірих вовків (GWO). Було проведено аналіз тактико-стратегічних прийомів вирішення конфліктних ситуацій між біологічними агентами, проаналізовано матеріали визначення та ефективного прийняття рішень задля максимізації виграшу, беручи за основу фундаментальні роботи Д. Неша та Е. Остром та інших дослідників теорії ігор та економіки, методів оптимізації, що працювали над вирішенням проблеми користування спільними ресурсами.

Було сформовано знання у вигляді кінцевої текстово-графічної технології про моделі та методи, стратегії ефективного вирішення міжгрупового конфлікту на прикладі координації інтелектуальних агентів вовчої зграї у вигляді текстової інформації, рисунків та діаграм.

Список літератури

1. Guerra-Pujol F. E. The parable of the prisoners. *SSRN electronic journal*. 2013. P. 39. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2281593> (date of access: 14.01.2026).
2. Bravetti A., Padilla P. An optimal strategy to solve the Prisoner's Dilemma. *Scientific reports*. 2018. Vol. 8(1). URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20426-w> (date of access: 24.11.2025).
3. Russell J. E., Xu X. The Prisoner's Dilemma game as a tool to investigate cooperation and undergraduate education in evolution. *Evolution: education and outreach*. 2024. Vol. 17, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12052-024-00205-0> (date of access: 24.11.2025).
4. Johnson T., Salahshour M. Seventy-five years later, the prisoner's dilemma narrative continues to impart new wisdom. *Europhysics letters*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ae20bb> (date of access: 24.11.2025).
5. Emergence of synchronization induced by the interplay between two prisoner's dilemma games with volunteering in small-world networks / Y. Chen et al. *Physical review E*. 2008. T. 77, № 3. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.77.032103> (date of access: 24.11.2025).
6. Kôno N. On a non-symmetric repeated prisoner's dilemma game in which (all d, all c) strategy is the best Nash equilibrium for one player. *Transactions of the operations research society of japan*. 2017. V. 60. P. 100–112. URL: <https://doi.org/10.15807/torsj.60.100> (date of access: 24.11.2025).
7. Zhang W. The prisoner's dilemma and the Nash equilibrium. *Game theory and society*. 2017. P. 31–57. URL: <https://doi.org/10.4324/9780203701584-2> (date of access: 24.11.2025).
8. Szolnoki A., Perc M. Evolutionary dynamics of cooperation in neutral populations. *New journal of physics*. 2018. V. 20, no. 1. P. 013031. URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa9fd2> (date of access: 24.11.2025).
9. Chaos and unpredictability in evolution of cooperation in continuous time / T. You et al. *Physical review E*. 2017. V. 96, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.96.062310> (date of access: 24.11.2025).
10. Babenko Y. Bioinspired models for metaheuristic optimization. *TechRxiv*. 2025. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.175693302.22402426/v1> (date of access: 24.11.2025).
11. Fioretti G., Policarpi A. The less intelligent the elements, the more intelligent the whole. or, possibly not?. *SSRN electronic journal*.

2020. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3699365> (date of access: 24.11.2025).
12. Exploiting evolutionary modeling to prevail in iterated prisoner's dilemma tournaments / M. Gaudesi et al. *IEEE transactions on computational intelligence and AI in games*. 2016. V. 8, no. 3. P. 288–300. URL: <https://doi.org/10.1109/tciaig.2015.2439061> (date of access: 24.11.2025).
 13. Rules, games, and common-pool resources. / A. Hamlin et al. *The economic journal*. 1995. V. 105, no. 431. P. 1034. URL: <https://doi.org/10.2307/2235179> (date of access: 24.11.2025).
 14. Ostrom E. Collective action and the evolution of social norms. *Journal of economic perspectives*. 2000. V. 14, no. 3. P. 137–158. URL: <https://doi.org/10.1257/jep.14.3.137> (date of access: 24.11.2025).
 15. Ostrom E. Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American economic review*. 2010. V. 100, no. 3. P. 641–672. URL: <https://doi.org/10.1257/aer.100.3.641> (date of access: 24.11.2025).
 16. Dietz T. The struggle to govern the commons. *Science*. 2003. V. 302, no. 5652. P. 1907–1912. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1091015> (date of access: 24.11.2025).
 17. Complexity of coupled human and natural systems / J. Liu et al. *Science*. 2007. V. 317, no. 5844. P. 1513–1516. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1144004> (date of access: 24.11.2025).
 18. Ostrom E. Revisiting the commons: local lessons, global challenges. *Science*. 1999. V. 284, no. 5412. P. 278–282. URL: <https://doi.org/10.1126/science.284.5412.278> (date of access: 24.11.2025).
 19. Field B. C., Ostrom E. Governing the commons: the evolution of institutions for collective action. *Land economics*. 1992. V. 68, no. 3. P. 354. URL: <https://doi.org/10.2307/3146384> (date of access: 24.11.2025).
 20. Lozinska A., Lobach O. Development of the information system for solving the problem of renting and buying housing in the Netherlands with the introduction of a contextual search algorithm: personalized and accelerated selection of real estate. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2025. No. 2(9). P. 62–68. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.9.9> (date of access: 24.11.2025).
 21. Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support / O. Kondratov et al. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2025. No. 2(9). P. 35–44. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.9.5> (date of access: 24.11.2025).
 22. Danchenko O., Semko A. Development of an anti-risk method of optimizing business processes. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2023. No. 1(7). P. 27–34. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.4> (date of access: 24.11.2025).
 23. Conflicts in project management / M. Grinchenko et al. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: strategic management, portfolio, program and project management*. 2022. No. 1(5). P. 50–55. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.5.6> (date of access: 24.11.2025).
 24. Hierarchical multi step Gray Wolf optimization algorithm for energy systems optimization / I. Dagal et al. *Scientific reports*. 2025. V. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92983-w> (date of access: 24.11.2025).
 25. Multi-Strategy grey wolf optimization algorithm for global optimization and engineering applications / L. Wang et al. *Journal of systems science and systems engineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11518-024-5622-z> (date of access: 24.11.2025).
 26. Multi-swarm improved Grey Wolf Optimizer with double adaptive weights and dimension learning for global optimization problems / S. Ma et al. *Mathematics and computers in simulation*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.10.007> (date of access: 24.11.2025).
 27. Multi-strategy grey wolf optimizer for engineering problems and sewage treatment prediction / C. Tang et al. *Advanced intelligent systems*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1002/aisy.202300406> (date of access: 24.11.2025).
 28. A hybrid multi-group co-evolution intelligent optimization algorithm: PSO-GWO / Z. Li et al. 2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT), Qingdao, China, 2–4 Jul. 2021y. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iceemt52412.2021.9601716> (date of access: 24.11.2025).
 29. Multi-Objective grey wolf optimizer based on improved head wolf selection strategy / Z. Zhang et al. 2024 43rd Chinese control conference (CCC), Kunming, China, 28–31 Jul. 2024 y. 2024. P. 1922–1927. URL: <https://doi.org/10.23919/ccc63176.2024.10662658> (date of access: 24.11.2025).
 30. A two-stage optimization framework for UAV fleet sizing and task allocation in emergency logistics using the GWO and CBBA / Y. Zhang et al. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 7. P. 501. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9070501> (date of access: 28.11.2025).
 31. Dao S. D. Particle swarm optimization (PSO) for constrained optimization problems. *Learn With Panda*. URL: <https://learnwithpanda.com/2020/05/19/particle-swarm-optimization-pso-for-constrained-optimization-problems/> (date of access: 24.11.2025).
 32. Glynatsi N. E., Knight V., Harper M. Properties of winning iterated prisoner's dilemma strategies. *PLOS computational biology*. 2024. T. 20, № 12. C. e1012644. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1012644> (date of access: 24.11.2025).
 33. Szilagyi M. N. An investigation of n-person prisoners' dilemmas. *Complex systems*. 2024. Vol. 14, no. 2. P. 155–174. URL: <https://doi.org/10.25088/complexsystems.14.2.155> (date of access: 26.11.2025).

References (transliterated)

1. Guerra-Pujol, F. E., (2013). The parable of the prisoners. *SSRN electronic journal* [online]. P. 39. Available from: doi: 10.2139/ssrn.2281593 (date of access: 14.01.2026).
2. Bravetti, A. and Padilla, P., (2018). An optimal strategy to solve the Prisoner's Dilemma. *Scientific Reports* [online]. No. 8(1). Available from: doi: 10.1038/s41598-018-20426-w (date of access: 24.11.2025).
3. Russell, J. E. and Xu, X., (2024). The Prisoner's Dilemma game as a tool to investigate cooperation and undergraduate education in evolution. *Evolution: Education and Outreach* [online]. No. 17(1). Available from: doi: 10.1186/s12052-024-00205-0 (date of access: 24.11.2025).
4. Johnson, T. and Salahshour, M., (2025). Seventy-five years later, the prisoner's dilemma narrative continues to impart new wisdom. *Europhysics Letters* [online]. Available from: doi: 10.1209/0295-5075/ae20bb (date of access: 24.11.2025).
5. Chen, Y., Qin, S.-M., Yu, L. and Zhang, S., (2008). Emergence of synchronization induced by the interplay between two prisoner's dilemma games with volunteering in small-world networks. *Physical Review E* [online]. No. 77(3). Available from: doi: 10.1103/physreve.77.032103 (date of access: 24.11.2025).
6. Kôno, N., (2017). On a non-symmetric repeated prisoner's dilemma game in which (all d, all c) strategy is the best Nash equilibrium for one player. *Transactions of the Operations Research Society of Japan* [online]. No. 60, pp. 100–112. Available from: doi: 10.15807/torsj.60.100 (date of access: 24.11.2025).
7. Zhang, W., (2017). The prisoner's dilemma and the Nash equilibrium. In: *Game theory and society* [online]. Routledge. pp. 31–57. Available from: doi: 10.4324/9780203701584-2 (date of access: 24.11.2025).
8. Szolnoki, A. and Perc, M., (2018). Evolutionary dynamics of cooperation in neutral populations. *New Journal of Physics* [online]. No. 20(1). Available from: doi: 10.1088/1367-2630/aa9fd2 (date of access: 24.11.2025).
9. You, T., Kwon, M., Jo, H.-H., Jung, W.-S. and Baek, S. K., (2017). Chaos and unpredictability in evolution of cooperation in continuous time. *Physical Review E* [online]. No. 96(6). Available from: doi: 10.1103/physreve.96.062310 (date of access: 24.11.2025).
10. Babenko, Y., (2025). Bioinspired models for metaheuristic optimization. *TechRxiv* [online]. P. 1–25. Available from: doi: 10.36227/techrxiv.175693302.22402426/v1 (date of access: 24.11.2025).
11. Fioretti, G. and Policarpi, A., (2020). The less intelligent the elements, the more intelligent the whole. or, possibly not? *SSRN*

- Electronic Journal* [online]. Available from: doi: 10.2139/ssrn.3699365 (date of access: 24.11.2025).
12. Gaudesi, M., Piccolo, E., Squillero, G. and Tonda, A., (2016). Exploiting evolutionary modeling to prevail in iterated prisoner's dilemma tournaments. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games* [online]. No. 8(3), P. 288–300. Available from: doi: 10.1109/tciaig.2015.2439061 (date of access: 24.11.2025).
 13. Hamlin, A., Ostrom, E., Gardner, R. and Walter, J., (1995). Rules, games, and common-pool resources. *The Economic Journal* [online]. No. 105(431), P. 1034. Available from: doi: 10.2307/2235179 (date of access: 24.11.2025).
 14. Ostrom, E., (2014). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of Natural Resources Policy Research* [online]. No. 6(4), P. 235–252. Available from: doi: 10.1080/19390459.2014.935173 (date of access: 24.11.2025).
 15. Ostrom, E., (2010). Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review* [online]. No. 100(3), P. 641–672. Available from: doi: 10.1257/aer.100.3.641 (date of access: 24.11.2025).
 16. Dietz, T., (2003). The struggle to govern the commons. *Science* [online]. No. 302(5652), P. 1907–1912. Available from: doi: 10.1126/science.1091015 (date of access: 24.11.2025).
 17. Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H. and Taylor, W. W., (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science* [online]. No. 317(5844), P. 1513–1516. Available from: doi: 10.1126/science.1144004 (date of access: 24.11.2025).
 18. Ostrom, E., (1999). Revisiting the commons: local lessons, global challenges. *Science* [online]. No. 284(5412), P. 278–282. Available from: doi: 10.1126/science.284.5412.278 (date of access: 24.11.2025).
 19. Field, B. C. and Ostrom, E., (1992). Governing the commons: the evolution of institutions for collective action. *Land Economics* [online]. No. 68(3), P. 354. Available from: doi: 10.2307/3146384 (date of access: 24.11.2025).
 20. Lozinska, A. and Lobach, O., (2025). Development of the information system for solving the problem of renting and buying housing in the netherlands with the introduction of a contextual search algorithm: personalized and accelerated selection of real estate. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 2(9), P. 62–68. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.9 (date of access: 24.11.2025).
 21. Kondratov, O., Severyn, V., Popazov, D., Liubarskyi, S. and Nikulina, O., (2025). Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 2(9), P. 35–44. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.5 (date of access: 24.11.2025).
 22. Danchenko, O. and Semko, A., (2023). Development of an anti-risk method of optimizing business processes. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 1(7), P. 27–34. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2023.7.4 (date of access: 24.11.2025).
 23. Grinchenko, M., Ponomaryov, O., Lobach, O. and Kharchenko, A., (2022). Conflicts in project management. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management* [online]. No. 1(5), P. 50–55. Available from: doi: 10.20998/2413-3000.2022.5.6 (date of access: 24.11.2025).
 24. Dagal, I., Ibrahim, A.-W., Harrison, A., Mbasso, W. F., Hourani, A. O. and Zaitsev, I., (2025). Hierarchical multi step Gray Wolf optimization algorithm for energy systems optimization. *Scientific Reports* [online]. No. 15(1). Available from: doi: 10.1038/s41598-025-92983-w (date of access: 24.11.2025).
 25. Wang, L., Zhang, Q., Yang, S. and Dong, Y., (2024). Multi-Strategy grey wolf optimization algorithm for global optimization and engineering applications. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* [online]. DOI: 024-5622-zs1151810.1007 (date of access: 24.11.2025).
 26. Ma, S., Fang, Y., Zhao, X. and Liu, Z., (2022). Multi-swarm improved Grey Wolf Optimizer with double adaptive weights and dimension learning for global optimization problems. *Mathematics and Computers in Simulation* [online]. DOI: j.matcom.2022.10.007 (date of access: 24.11.2025).
 27. Tang, C., Huang, C., Chen, Y., Heidari, A. A., Wang, S., Chen, H. and Zhang, Y., (2024). Multi-strategy grey wolf optimizer for engineering problems and sewage treatment prediction. *Advanced Intelligent Systems* [online]. DOI: aisy.202300406 (date of access: 24.11.2025).
 28. Li, Z., Zuo, J., Lv, R., Liu, Z. and Wang, Y., (2021). A hybrid multi-group co-evolution intelligent optimization algorithm: PSO-GWO. *2021 IEEE international conference on electrical engineering and mechatronics technology (ICEEMT)*, 2–4 Jul. 2021, Qingdao, China [online]. IEEE. DOI: iceemt52412.2021.9601716 (date of access: 24.11.2025).
 29. Zhang, Z., Xu, T., Zou, K., Tan, S. and Sun, Z., (2024). Multi-Objective grey wolf optimizer based on improved head wolf selection strategy. *U: 2024 43rd Chinese control conference (CCC)*, 28–31 Jul. 2024, Kunming, China [online]. IEEE. P. 1922–1927. DOI: ccc63176.2024.10662658 (date of access: 24.11.2025).
 30. Zhang, Y., Xu, W., Ye, H. and Shi, Z., (2025). A two-stage optimization framework for UAV fleet sizing and task allocation in emergency logistics using the GWO and CBBA. *Drones* [online]. No. 9(7), P. 501. DOI: 10.3390/drones9070501 (date of access: 24.11.2025).
 31. Dao, S. D., (2020). Particle swarm optimization (PSO) for constrained optimization problems [online]. *Learn With Panda*. URL: <https://learnwithpanda.com/2020/05/19/particle-swarm-optimization-pso-for-constrained-optimization-problems/> (date of access: 24.11.2025).
 32. Glynatsi, N. E., Knight, V. and Harper, M., (2024). Properties of winning iterated prisoner's dilemma strategies. *PLOS computational biology* [online]. V. 20(12), No. e1012644. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1012644 (date of access: 24.11.2025).
 33. Szilagy, M. N., (2024). An investigation of n-person prisoners' dilemmas. *Complex Systems* [online]. No. 14(2), P. 155–174. DOI: 10.25088/complexsystems.14.2.155 (date of access: 24.11.2025).

Надійшла (received) 28.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Скрипка Богдан Юрійович (Skrypka Bohdan) – аспірант кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; email: bohdan.skrypka@cs.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1964-5332>.

Єльчанінов Дмитро Борисович (Yelchaninov Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; email: dmytro.yelchaninov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5163-9117>.

В. О. ТИМОФЕЄВ, А. І. РОГОВИЙ**СЕНСОРНІ МОДАЛЬНОСТІ ДЛЯ ВІДНОСНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ КООПЕРАТИВНИХ РОЇВ БПЛА В СЕРЕДОВИЩАХ БЕЗ GNSS**

Розгортання кооперативних роїв безпілотних літальних апаратів у середовищах без доступу до глобальної навігаційної супутникової системи є однією з ключових проблем сучасних автономних багатоагентних систем. В таких умовах відносна локалізація між агентами має забезпечувати достатню точність і узгодженість за наявності суворих обмежень щодо габаритів, ваги та енергоспоживання, характерних для мікроапаратів. У статті проведено систематичний огляд сенсорних модальностей, що застосовуються для відносної локалізації кооперативних роїв у середовищах без супутникової навігації, з акцентом на їх обчислювальні властивості, спостережуваність та стійкість до впливу факторів навколишнього середовища. У роботі проаналізовано та класифіковано три основні класи сенсорних модальностей: радіочастотні методи визначення відстані на основі надширокопasmового зв'язку, пасивні візуальні методи, включно з візуально-інерційною одометрією та підходами на основі глибокого навчання, а також системи активних оптичних маркерів. Показано, що радіочастотні методи забезпечують низьке обчислювальне навантаження, проте мають фундаментальні обмеження спостережуваності через відсутність кутової інформації. Пасивні візуальні підходи здатні забезпечувати високу точність і глобальну узгодженість, однак вимагають значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх практичне застосування на платформах з жорсткими апаратними обмеженнями. Критичний аналіз свідчить, що системи активних оптичних маркерів у поєднанні з розподіленими методами оптимізації графів стану є практично доцільним компромісом між точністю, обчислювальною ефективністю та стійкістю до деградованих умов. Особливу увагу приділено архітектурам розподіленого оцінювання, які забезпечують масштабованість та узгодженість без централізованої обробки. У висновках окреслено напрями подальших досліджень, спрямованих на створення гібридних фреймворків, здатних динамічно перемикатися між режимами повної оцінки відносної пози та відстеження лише за напрямком у складних середовищах.

Ключові слова: багатоагентні системи, відносна локалізація, комп'ютерний зір, візуально-інерційна одометрія, кооперативний SLAM, розподілена оптимізація, факторні графи, сенсорне злиття, активні оптичні маркери, середовища без GNSS, автономні БПЛА, обмеження SWaP.

V. TYMOFIEIEV, A. ROGOVYI**SENSOR MODALITIES FOR RELATIVE LOCALIZATION OF COOPERATIVE UAV SWARMS IN GNSS-DENIED ENVIRONMENTS**

The deployment of cooperative swarms of unmanned aerial vehicles in environments without access to global satellite navigation systems represents one of the key challenges in modern autonomous multi-agent systems. Under such conditions, relative localization among agents must provide sufficient accuracy and consistency while operating under strict constraints on size, weight, and power consumption, which are characteristic of mass-produced micro-scale platforms. This paper presents a systematic review of sensor modalities used for relative localization of cooperative swarms in navigation-denied environments, with a particular focus on their computational properties, observability, and robustness to environmental factors. The study analyzes and classifies three principal classes of sensor modalities: radio-frequency distance measurement based on ultra-wideband communication, passive visual methods including visual-inertial odometry and deep learning-based approaches, and systems employing active optical markers. The analysis demonstrates that radio-frequency ranging methods offer low computational cost but suffer from fundamental observability limitations due to the lack of angular information. Passive visual approaches are capable of achieving high accuracy and global consistency; however, they require substantial computational resources, which restricts their practical applicability on platforms with severe hardware constraints. A critical evaluation indicates that active optical marker systems, when combined with distributed state graph optimization methods, constitute a practically viable compromise between localization accuracy, computational efficiency, and robustness under degraded environmental conditions. Particular attention is given to distributed estimation architectures that enable scalability and consistency without centralized processing. The paper concludes by outlining directions for future research aimed at developing hybrid frameworks capable of dynamically switching between full relative pose estimation and direction-only tracking in challenging operational environments.

Keywords: multi-agent systems, relative localization, computer vision, visual-inertial odometry, cooperative simultaneous localization and mapping, distributed optimization, factor graphs, sensor fusion, active optical markers, GNSS-denied environments, autonomous unmanned aerial vehicles, SWaP constraints.

1 Вступ. Операційна здатність роїв безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в складних середовищах без доступу до глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) — таких як підземні тунелі або щільні міські каньйони — фундаментально залежить від здатності агентів локалізувати себе відносно один одного. Хоча навігація одного агента досягла значної зрілості завдяки візуально-інерційній одометрії, розширення цих пайплайнів на кооперативні рої зазвичай вимагає додаткових сенсорів, зв'язку між агентами та системної багатоагентної оптимізації. Ці вимоги перевищують обмеження щодо габаритів, ваги та енергоспоживання (SWaP - Size, Weight and Power) легких платформ мікро-БПЛА. Масові мікро-БПЛА часто мають обмежену бортову обчислювальну потужність (наприклад, мікроконтролери STM32) і не

можуть підтримувати великі обчислювальні навантаження, необхідні для традиційних централізованих архітектур SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).

1.1 Поляризація сенсорних модальностей. Сучасні дослідження демонструють чітку поляризацію підходів до сенсорних модальностей, під якими розуміється тип фізичної величини та механізм її вимірювання, за допомогою яких агент отримує інформацію про навколишнє середовище або інших агентів (наприклад, радіочастотні сигнали, світло або інерційні дані). Вибір сенсорної модальності безпосередньо визначає характер доступних вимірювань, їхню спостережуваність, обчислювальну складність обробки та стійкість до зовнішніх впливів.

© В. О. Тимофеев, А. І. Роговий, 2025

З одного боку, радіочастотні (RF) модальності, зокрема надширокопasmовий зв'язок (UWB), забезпечують виняткову обчислювальну ефективність завдяки простоті обробки дальномірних вимірювань. Проте, як показано в роботах [1, 2], вимірювання лише відстані є теоретично неспостережуваними щодо повної відносної пози, що змушує агентів виконувати постійні енергонеєфективні маневри збудження для усунення геометричних неоднозначностей. Додатковим обмеженням є те, що активні RF-випромінювання можуть порушувати вимоги електромагнітної тиші в чутливих або обмежених середовищах.

З іншого боку, пасивні візуальні модальності, які базуються на обробці зображень та ознаках глибокого навчання, наприклад у системах на кшталт SuperVINS [3], здатні забезпечувати високу надійність і робастність у складних умовах освітлення. Водночас ці підходи характеризуються високими обчислювальними вимогами, формуючи так звану «високу обчислювальну стелю»: для роботи в реальному часі вони часто потребують графічних процесорів настільного рівня, що робить їх непридатними для легких повітряних платформ із жорсткими обмеженнями SWaP.

1.2 Обґрунтування дослідницького питання.

Кооперативна відносна локалізація фундаментально залежить від типу вимірювань сенсорів, доступних між агентами. Різні сенсорні модальності – зір, Ultra-Wideband (UWB), активні маркери та їх гібридні комбінації – надають принципово різну інформацію про відносний стан агентів. Як продемонстрували автори [4], існують чіткі компроміси між UWB, який забезпечує точність вимірювання дальності, але не має пеленгових даних, та візуальними методами, які надають кутові або позиційні дані, але на які впливає навколишнє середовище (освітлення, візуальні перешкоди).

Сенсорна модальність визначає спостережуваність системи, тобто які компоненти відносного стану можуть бути відновлені одночасно. Таке обмеження проаналізовано в роботі [5], де авторами показано необхідні умови оцінки стану у кооперативних системах. Крім того, модальність визначає робастність алгоритмів до зовнішніх впливів, таких як зміна освітлення, зашумленість радіоканалу або вплив радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Мета статті – дослідити компроміси між різними сенсорними модальностями (візуальні методи, UWB, активні оптичні маркери) з точки зору точності локалізації, обчислювального навантаження та стійкості до факторів навколишнього середовища, зокрема змін освітлення та умов радіоелектронної боротьби.

2. Методологія огляду. В цьому огляді застосовано систематичну стратегію відбору, яка спрямована на виявлення архітектур відносної локалізації, придатних для масових мікро-БПЛА з

обмеженими ресурсами (габарити, вага, енергоспоживання – SWaP). На відміну від загальних оглядів SLAM, які часто ставлять пріоритетом максимальну точність незалежно від обчислювальної вартості, цей огляд фільтрує літературу за чотирма строгими критеріями доцільності:

- Децентралізація – не вимагає наземної станції управління або центрального сервера.

- Бортові обчислення – спеціально орієнтовані на класи мікроконтролерів (наприклад, STM32) або процесорів з низьким енергоспоживанням, а не на GPU настільного класу.

- Незалежність від GNSS – забезпечує роботу в заглушених, закритих або підземних середовищах.

- Відсутність важких сенсорів – зокрема LiDAR, непридатних для мікро-БПЛА.

Пошук літератури надавав пріоритет методам, здатним до «тихої» координації та стійкості до шуму навколишнього середовища. У цьому контексті активні оптичні маркери (зокрема системи на основі УФ/світлодіодів) мали пріоритет над пасивними візуальними методами. Цей вибір не є довільним, а безпосередньо впливає з аналізу компромісів, представленого в розділі 3.

Зокрема, у роботі [3] показано, що візуально-інерційна одометрія (VIO) – метод локалізації, який поєднує дані камери та інерційного вимірювального блока (IMU) для оцінювання власного руху БПЛА – у варіантах на основі глибокого навчання потребує значного GPU-прискорення (наприклад, NVIDIA RTX 2060) для роботи в реальному часі. Такі вимоги суперечать обмеженням SWaP, характерним для платформ мікро-БПЛА.

Водночас радіочастотна далекометрія на основі UWB, попри низьку обчислювальну складність і придатність для вбудованих систем, має фундаментальне обмеження: як математично доведено в роботах [1] та [2], вимірювання лише дальності не забезпечують повної спостережуваності відносного стану, що унеможливує однозначне визначення взаємного положення агентів без додаткових маневрів або допоміжних сенсорних модальностей.

3. Таксономія підходів до кооперативної локалізації. Кооперативна відносна локалізація для роїв БПЛА в середовищах без GNSS охоплює гетерогенний простір проектних рішень, що визначається поєднанням сенсорних модальностей, архітектур злиття даних та механізмів масштабованості. Існуючі роботи варіюються від ультралегких методів локалізації «тільки за дальністю», реалізованих на мікроконтролерах, до складних візуально-інерційних пайплайнів з використанням глибокого навчання та GPU-прискорення.

Уздовж осі сенсорної модальності розрізняємо такі категорії:

(i) Активні оптичні маркери. До них відносяться сузір'я УФ-світлодіодів, що використовуються в системах типу UVDAR для взаємної локалізації, видимі/ТЧ світлодіодні цілі для позиціонування на

великих відстанях у стилі PnP, а також варіанти маркерів на основі подій.

(ii) Пасивні візуальні методи. Містять класичні підходи VIO на основі ознак, а також сучасні пайплайни, що інтегрують методи глибокого навчання для підвищення робастності сприйняття, зокрема такі системи, як SuperVINS.

(iii) Радіочастотна далекометрія. Ґрунтується переважно на вимірюванні відстані за допомогою надширокосмугового зв'язку (UWB) та включає гібридні конфігурації з VIO.

(iv) Гібридні сенсорні модальності.

Передбачають комбінування активних маркерів, візуальних сенсорів та RF вимірювань для покращення спостережуваності та надійності локалізації в складних умовах.

Ця вісь відображає, як різні варіанти сенсорів знаходять компроміс між спостережуваністю, стійкістю до освітлення та перешкод, а також обмеженнями до апаратного забезпечення в умовах SWaP мікро-БПЛА. Рисунок 1 підсумовує таксономію.

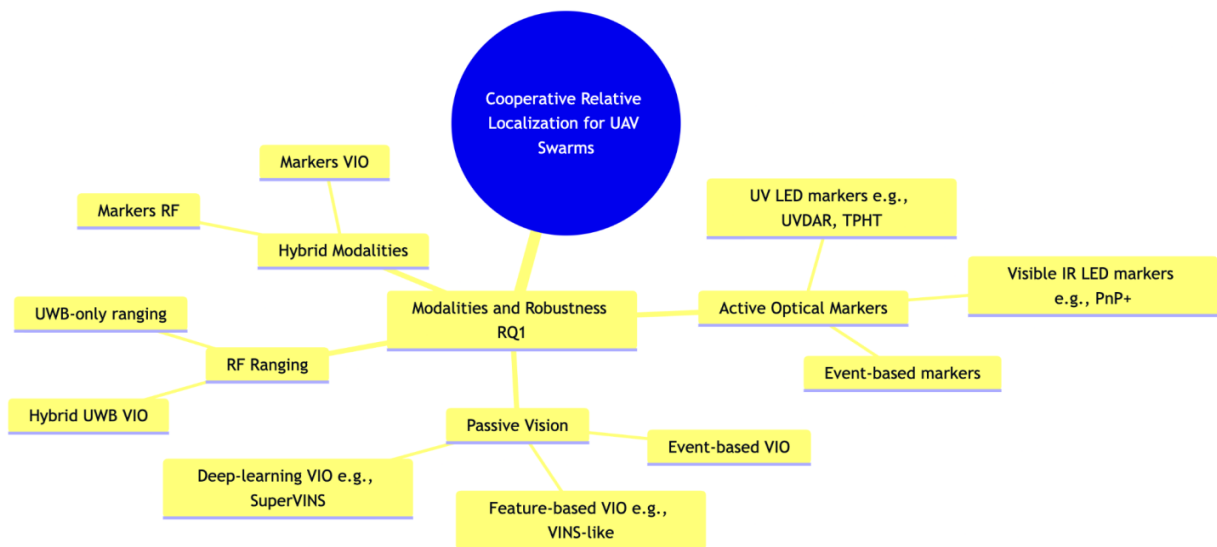


Рис. 1. Таксономія сенсорних модальностей та методів злиття даних у підходів до кооперативної локалізації кількох БПЛА

4. Сенсорні модальності для відносної локалізації

Щоб досягти децентралізованої координації в середовищах без GNSS, повітряні рої повинні покладатися на бортові екстероцептивні сенсори для оцінки відносних станів сусідніх агентів. Сучасні дослідження класифікують ці модальності на три різні класи: радіочастотна (RF) далекометрія, пасивні візуальні ознаки та активні оптичні маркери. Далі розглянемо компроміси цих модальностей щодо точності, обчислювального навантаження та стійкості в несприятливих умовах.

4.1. Радіочастотна далекометрія (UWB)

В теперішній час сенсори надширокосмугового зв'язку (UWB) стали стандартом для відносної локалізації в легкій робототехніці завдяки своїй здатності всеспрямованого зондування та малій вазі. Бортова система визначення дальності, яка представлена в [1], демонструє, що шляхом обміну пакетами агенти можуть оцінювати відстані один між одним за допомогою вимірювань часу прольоту (ToF).

Переваги. Системи UWB є обчислювально легкими і можуть функціонувати в повній темряві або при візуальних перешкодах (дим/туман), коли камери не справляються. Протокол, представлений в роботі [1], демонструє масштабованість для роїв до 13 агентів, які використовують мікроконтролери STM32 з частотою зв'язку 16 Гц.

Обмеження. Основним обмеженням UWB є те, що вона надає можливість вимірювати лише дальність. Аналіз спостережуваності, який представлено в роботі [2], підтверджує, що без інформації про пеленг (кут) відносний стан агентів є неспостережуваним, якщо вони не виконують специфічних маневрів для усунення обмеження неоднозначності своїх позицій. Теоретичний аналіз підтверджує, що оцінка тільки за дальністю страждає від неспостережуваних підпросторів, що вимагають від агентів постійного руху для підтримки локалізації, а це, в свою чергу, обмежує зависання або приховані статичні формації. Крім того, системи на основі RF порушують вимоги електромагнітної тиші, що робить їх вразливими до виявлення та глушіння засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ).

4.2. Пасивні візуальні ознаки та глибоке навчання

Пасивні візуальні підходи покладаються на стандартні камери для відстеження природних ознак навколишнього середовища (кути, краї) або дескрипторів ознак глибокого навчання. Такі методи, наприклад VINS-Fusion або ORB-SLAM, є фундаментальними для оцінки власного руху одного агента [6].

Переваги. Фреймворк SuperVINS, запропонований в роботі [3], демонструє чудову стійкість у середовищах без текстури або з низьким

освітленням завдяки вилученню високорівневих семантичних ознак, а не простих геометричних точок. Такі методи можуть досягати високої точності в замиканні циклів та глобальній узгодженості.

Обмеження. Візуальні підходи характеризуються значним обчислювальним навантаженням. Сучасні методи на основі глибокого навчання потребують виконання інференсу, тобто обчислення вихідних ознак або оцінок стану нейронною мережею для кожного вхідного зображення в режимі реального часу. Це часто вимагає використання потужних GPU (наприклад, NVIDIA RTX), що суперечить обмеженням SWaP малих БПЛА. Крім того, пасивний зір швидко деградує за умов змінного освітлення, низького контрасту або повторюваних візуальних структур [3].

4.3. Активні оптичні маркери (LEDs)

Системи активних маркерів використовують сузір'я світлодіодів (LED), які часто працюють в ультрафіолетовому (УФ) або інфрачервоному (ІЧ) спектрі, для забезпечення висококонтрастних візуальних реперних точок [7].

Переваги:

Надійність. Система UVDAR, представлена в [8], використовує смугові фільтри (наприклад, пропускання УФ). Такі системи можуть ефективно «вимикати» сонце та фоновий шум, забезпечуючи надійне виявлення навіть під прямими сонячними променями або у візуально шумних середовищах [7].

Спостережуваність. На відміну від UWB, оптичні маркери надають вимірювання тільки пеленгу (азимут/елевація). У поєднанні з відомою геометрією маркерів (PnP), вони дають повні 6-DoF відносні оцінки положення [9]. Навіть у режимах «тільки

пеленг», де відстань є неоднозначною, управління трикутною формацією залишається теоретично та практично вирішуваним питанням [10].

Ефективність ідентифікації. Для розрізнення агентів застосовується Перетворення Хафа часу-позиції (Time-Position Hough Transform, TPHT) — метод, що аналізує зміни положення світлових плям у часі для виявлення заданих патернів миготіння світлодіодів. Це дозволяє надійно ідентифікувати кожен БПЛА за його унікальним часовим кодом з мінімальними обчислювальними витратами та без використання радіозв'язку [11].

Обмеження:

Залежність від прямої видимості. На відміну від радіочастотних систем, активні маркери суворо вимагають прямої візуальної видимості; відстеження переривається, якщо ціль перекрита перешкодами або якщо сузір'я маркерів відвертається від камери.

Обмежена дальність. Ефективна дальність виявлення є помірною (близько 15 м для стандартної оптики), що значно менше, ніж дальність понад 100 м, яка досягається системами UWB.

Геометрична крихкість. Повна оцінка пози 6-DoF покладається на видимість повного сузір'я маркерів; часткова оклюзія змушує систему переходити в режим «тільки за пеленгом», який часто є крихким і вимагає специфічної геометрії формації для усунення неоднозначностей масштабу.

4.4. Кількісне порівняння модальностей

В таблиці 1 представлено синтез характеристик систем локалізації. Наведені дані підкреслюють конкретні компроміси між спостережуваністю, обчислювальною вагою та стійкістю до впливу чинників навколишнього середовища.

Таблиця 1 – Кількісне порівняння модальностей відносної локалізації

Характеристика	UWB	Пасивний зір (DL)	Активні маркери
Тип вимірювання	Дальність (1D)	Пеленг (2D) + Структура	Пеленг (2D) + ID
Спостережуваність	Слабка/Умовна	Висока	Висока
Макс. дальність	>100 м	Змінна	~15 м
Частота оновлення	16–100 Гц	10–30 Гц	>70 Гц
Клас обчислень	MCU (STM32)	GPU (RTX)	MCU/CPU
Точність	0.13–0.22 м	0.15–0.20 м	<0.05 м

Таблиця 2 підсумовує можливості наведених модальностей щодо ключових обмежень дослідження. Показник «Середовище» відображає інтегральну стійкість сенсорної модальності до деградацій навколишніх умов, таких як зміни освітлення,

перешкоди, зашумлення сигналу та зовнішні завади. Значення «високе» означає збереження працездатності у широкому діапазоні умов, тоді як «низьке» вказує на суттєве зниження ефективності за несприятливих впливів.

Таблиця 2 – Можливості модальностей щодо обмежень дослідження

Модальність	Тип	SWaP	Стійкість до РЕБ	Середовище
RF (UWB)	Дальність	Дуже низьке	Погана	Висока
Пасивний зір	Пеленг	Високе	Висока	Низька
Активні маркери	Пеленг+ID	Низьке	Висока	Висока

5. Архітектури оцінювання. Для перетворення сирих сенсорних вимірювань на глобально узгоджені відносні оцінки положення, сучасні системи кооперативної локалізації використовують ієрархічні

архітектури оцінювання. Зазвичай, типова архітектура складається з трьох шарів: локального шару візуально-інерційної одометрії (VIO) для забезпечення індивідуальної стабільності кожного агента,

геометричного шару відносних спостережень (PnP) для оцінювання відносних позицій між агентами, та розподіленого бекенду оцінювання, призначеного для злиття цих оцінок у всьому рої.

Основа VIO. Перш ніж дрон зможе оцінити положення сусіднього агента, він повинен спочатку надійно оцінити свій власний рух. Як детально узагальнено в огляді [6], візуально-інерційна одометрія (VIO) служить фундаментом для локалізації, поєднуючи високочастотні дані IMU з треками візуальних ознак для забезпечення плавної та короткостроково стабільної локальної системи відліку.

Розподілена оптимізація графа. Система D2SLAM [12] використовує архітектуру розділення «Ближнє-Далеке». Оцінювач «Ближнього поля» обробляє високочастотні, високоточні оновлення для близьких сусідів через розподілений факторний граф, тоді як оцінювач «Далекого поля» асинхронно оптимізує глобальний граф поз для корекції довгострокового дрейфу.

Узгодженість через перетин коваріацій. Критичною проблемою в розподілених графах є «подвійний підрахунок» інформації. Розподілений оцінювач [13] використовує перетин коваріацій (CI) в рамках розширеного фільтра Калмана (ЕКФ). Консервативно оцінюючи межі коваріації, кожен робот може оновлювати свій власний стан, використовуючи дані сусідів, без відстеження повної матриці крос-коваріації всього рою.

6. Висновки. У статті систематично оцінено сучасний стан сенсорних модальностей для відносної локалізації кооперативних роїв БПЛА з орієнтацією на платформи з обмеженими ресурсами, що працюють у середовищах без GNSS. Класифікуючи існуючі методології на радіочастотну далекометрію, пасивний зір та активні оптичні маркери, було виявлено фундаментальні компроміси між точністю, обчислювальними витратами (SWaP) та стійкістю до факторів навколишнього середовища.

Активні оптичні маркери як оптимальний компроміс SWaP. Хоча підходи на основі глибокого навчання забезпечують високу стійкість візуальних ознак, їхні обчислювальні вимоги роблять їх непридатними для масових мікро-БПЛА. Водночас, системи «тільки за дальністю» на основі UWB є обчислювально легкими, але страждають від проблем спостережуваності. Системи активних УФ-маркерів займають проміжне, практично доцільне положення, забезпечуючи високоточні вимірювання пеленгу та унікальну ідентифікацію агентів з мінімальними обчислювальними накладними витратами.

Розподілена оптимізація як необхідна умова масштабованості. Централізовані архітектури створюють вузькі місця в комунікації. Розподілені факторні графи, доповнені перетином коваріацій, забезпечують математично узгоджену структуру для масштабованого злиття даних.

У підсумку, конвергенція активних оптичних маркерів із розподіленою оптимізацією графа представляє найбільш перспективний напрям для створення надійних, масштабованих та інформаційно «тихих» повітряних роїв. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку гібридних фреймворків, здатних динамічно перемикатися між режимами повної пози та «тільки за пеленгом» для підтримки узгодженості в деградованих середовищах.

References

- Li S., Shan F., Liu J. et al. Onboard Ranging-based Relative Localization and Stability for Lightweight Aerial Swarms. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2003.05853.
- Gong B., Wang S., Hao M. et al. Range-based collaborative relative navigation for multiple unmanned aerial vehicles using consensus extended Kalman filter. *Aerospace Science and Technology*. Vol. 112, 2021. P. 106647.
- Luo H., Liu Y., Guo C. et al. SuperVINS: A Real-Time Visual-Inertial SLAM Framework for Challenging Imaging Conditions. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.21348.
- Masiero A., Gurturk M., Toth C. et al. A Test on Collaborative Vision and UWB-based Positioning. *ISPRS Archives*. Vol. XLVIII-1/W2-2023. P. 1185–1190.
- Chakraborty A., Sharma R., Brink K. M. Cooperative Localization for Multirotor Unmanned Aerial Vehicles. *AIAA*, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-0684.
- Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. *arXiv*, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1906.02650.
- Walter V., Saska M., Franchi A. Fast Mutual Relative Localization of UAVs using Ultraviolet LED Markers. *Proc. of IEEE ICUAS*, 2018. P. 1217–1226.
- Walter V., Staub N., Franchi A. et al. UVDAR System for Visual Relative Localization With Application to Leader-Follower Formations of Multirotor UAVs. *IEEE RA-L*. Vol. 4, Issue 3. P. 2637–2644.
- Jospin L., Stoven-Dubois A., Cucci D. A. Photometric Long-Range Positioning of LED Targets for Cooperative Navigation in UAVs. *Drones*. Vol. 3, Issue 3. P. 69.
- Li S., Lei H., Zhu C. et al. Bearing-Only Passive Localization and Optimized Adjustment for UAV Formations Under Electromagnetic Silence. *Drones*. Vol. 9, Issue 11. P. 767.
- Walter V., Staub N., Saska M. et al. Mutual Localization of UAVs based on Blinking Ultraviolet Markers and 3D Time-Position Hough Transform. *IEEE CASE*, 2018. P. 298–303.
- Xu H., Liu P., Chen X. et al. D2SLAM: Decentralized and Distributed Collaborative Visual-inertial SLAM System for Aerial Swarm. *arXiv*, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01538.
- Zhu P., Geneva P., Ren W. et al. Distributed Visual-Inertial Cooperative Localization. *Proc. of IEEE/RSJ IROS*, 2021. P. 8714–8721.

Надійшла (received) 28.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Тимофєєв Віталій Олександрович (Tymofieiev Vitalii) – аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: vitalikplus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7978-3472>.

Роговий Антон Іванович (Rogovyi Anton) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Anton.Rogovyi@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8178-4585>.

O. CHEREDNICHENKO, V. MALIARENKO**THE DISPATCHER: BRIDGING THE PROBABILISTIC GAP IN AUTOMATED DECISION MODELING**

In the contemporary landscape of Software Engineering and Business Process Management (BPM), the integration of generative artificial intelligence has precipitated a paradigm shift from manual, deterministic specification to automated, probabilistic generation. While offering scalability, this transition introduces a fundamental volatility known as the "Probabilistic Gap"—the chasm between the fluid, high-variance output of Large Language Models (LLMs) and the strict, zero-tolerance syntactic requirements of execution engines like DMN (Decision Model and Notation). This paper addresses the "Struc-Bench Paradox," highlighting the limitations of transformer architectures in generating complex structured data without rigid orchestration. The study formally defines and implements the "Dispatcher," a pivotal control plane component designed to function as an intelligent resource arbiter and quality gatekeeper within a neuro-symbolic architecture. The theoretical framework shifts the economic focus from Baumol's Cost Disease, which addresses production speed, to Boehm's Law of Software Economics, which emphasizes the exponential cost of defects propagated to production. To operationalize this, the Dispatcher represents a discrete deterministic process modeled using Cost-Colored Petri Nets rather than Finite State Machines (FSMs). The Petri Net formalism allows for precise modeling of concurrency, state accumulation, and the strict enforcement of "Retry Budgets," thereby mathematically guaranteeing system termination and preventing infinite loops of costly regeneration. The architectural implementation utilizes a "Test-First" generation philosophy: the system first synthesizes validation criteria (JSON test cases) utilizing Schema Injection and RAG, and subsequently grounds the generation of DMN logic (XML) in these pre-validated scenarios. Experimental analysis was conducted using a controlled set of 200 generation cycles to evaluate two distinct error-recovery strategies: Strategy A (Independent regeneration of DMN tables only) and Strategy B (Joint/Dynamic regeneration of both DMN and Test Cases). Quantitative results demonstrate that Strategy B is economically superior, achieving a 6.06% reduction in total cost and an 8.44% reduction in token consumption compared to the independent patching approach. The findings indicate that simultaneous regeneration empowers the LLM to resolve semantic incoherence and hallucinations more effectively than iterative repairs, prioritizing logical consistency over partial code retention. The study concludes that the Dispatcher effectively bridges the neuro-symbolic divide by transforming validation from a post-production manual review into a pre-production automated cycle. By enforcing a "Stop-Loss" mechanism driven by economic constraints, the framework minimizes the Total Cost of Ownership and serves as a critical "Trust Proxy," mitigating automation bias and ensuring that AI-generated artifacts meet the rigorous reliability standards required for enterprise deployment.

Keywords: Large Language Models; Automated Decision Modeling; Petri Nets; Validation and Verification; Business Process Management.

О. Ю. ЧЕРЕДНІЧЕНКО, В. В. МАЛЯРЕНКО**ДИСПАТЧЕР: ПОДОЛАННЯ ІМОВІРНІСНОГО РОЗРИВУ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ МОДЕЛЮВАННІ РІШЕНЬ**

У сучасному ландшафті управління бізнес-процесами (BPM) та програмної інженерії інтеграція генеративного штучного інтелекту зумовила фундаментальний зсув парадигми від ручної детермінованої специфікації до автоматизованої імовірнісної генерації. Цей перехід, забезпечуючи безпрецедентну масштабованість, створює критичний «імовірнісний розрив» між стохастичною природою великих мовних моделей (LLM) та суворими синтаксичними вимогами середовищ виконання рішень, таких як DMN (Decision Model and Notation). Дослідження фокусується на вирішенні проблеми «Struc-Bench Paradox», яка демонструє нездатність стандартних трансформерних архітектур надійно генерувати складні структуровані дані без зовнішнього керування. Центральним елементом запропонованого рішення є «Dispatcher» (Диспатчер) – архітектурний компонент, що виконує роль інтелектуального арбітра ресурсів та шлюзу якості в нейро-символічній системі. Методологічною основою роботи є перехід від економічної теорії «хвороби витрат Баумоля», яка пріоритезує швидкість виробництва, до «закона економіки ПЗ Боема», що встановлює логарифмічну залежність між часом виявлення дефекту та вартістю його виправлення. Для формалізації дискретних детермінованих процесів Диспатчера у роботі застосовано математичний апарат Мереж Петрі (Cost-Colored Petri Nets) замість класичних скінченних автоматів (FSM). Це дозволило ефективно моделювати стан системи, управляти конкурентністю процесів та суворо контролювати бюджет повторних спроб (retry budget), уникаючи ризиків нескінченних циклів регенерації та «спіралі смерті» витрат токенів. Реалізація системи базується на патерні «Test-First Generation», де процес валідації відокремлено від генерації бізнес-логіки: спочатку формуються тестові кейси (JSON), і лише на їх основі генерується DMN-модель, яка негайно перевіряється вбудованим рушієм Camunda. Емпірична частина дослідження включає аналіз ефективності двох стратегій відновлення після помилок на вибірці з 200 циклів генерації: Стратегії А (незалежна регенерація тільки таблиці DMN) та Стратегії В (спільна регенерація DMN та тестових кейсів). Результати експерименту виявили контрінтуїтивну перевагу Стратегії В, яка продемонструвала зниження загальної вартості генерації на 6,06% та скорочення споживання токенів на 8,44%, при досягненні 100% успішності валідації. Доведено, що повна регенерація контексту дозволяє LLM усунути логічні галюцинації ефективніше, ніж ітеративне виправлення окремих фрагментів коду. Отримані результати підтверджують, що Диспатчер виступає економічним щитом підприємства, забезпечуючи принцип «fail fast and fix cheap» (швидка помилка – дешеве виправлення). Впровадження запропонованого фреймворку трансформує процес створення моделей рішень з ризикованого експерименту у надійну інженерну дисципліну, де символічний валідатор виступає гарантом істини для нейронного генератора, забезпечуючи довіру користувачів та стабільність бізнес-систем.

Ключові слова: великі мовні моделі, автоматизоване моделювання рішень, мережі Петрі, валідація та верифікація, управління бізнес-процесами.

1. Introduction. In the contemporary landscape of software engineering and Business Process Management, the integration of generative artificial intelligence has precipitated a paradigm shift. We are moving from an era of manual, deterministic specification to one of automated, probabilistic generation. This transition, while offering unprecedented scalability, introduces a fundamental volatility into the heart of enterprise architecture. The

central challenge is no longer the generation of code or logic – Large Language Models have demonstrated sufficiency in this regard – but rather the rigid orchestration of these non-deterministic outputs into reliable, executable artifacts.

This report focuses on the Dispatcher, the pivotal component of a proposed framework designed to automate the creation of Decision Model and Notation artifacts. The

Dispatcher is not merely a message router; it is an intelligent control system, a resource arbiter, and a quality gatekeeper. It exists to bridge the "Probabilistic Gap" – the chasm between the fluid, high-variance output of an LLM and the strict, zero-tolerance syntactic requirements of a DMN execution engine like Camunda.

Historically, the automation of decision logic has been viewed through the lens of Baumol's Cost Disease, which posits that labor-intensive sectors, like business analysis, suffer from stagnant productivity compared to manufacturing [1]. While valid, this economic theory addresses only the speed of production. In the context of AI-generated code, the more pressing economic principle is Boehm's Law of Software Economics [2]. It is often cited in quality engineering contexts as Bem's Law of the cost of defects.

Boehm's Law establishes a logarithmic relationship between the time a defect remains in a system and the cost to repair it [3]. An error in a decision table caught during the drafting phase costs strictly the time required to rewrite a line of text. The same error, if propagated to a production runtime environment, incurs costs related to system downtime, regulatory fines, customer service remediation, and reputational damage. The cost differential can arguably exceed 100:1.

Therefore, the primary economic mandate of the Dispatcher is not simply to "generate DMN fast" (addressing Baumol) but to "fail fast and fix cheap" (addressing Boehm). By encapsulating the generation process within a rigorous, iterative validation loop, the Dispatcher spends cheap computational resources, like tokens, to prevent expensive operational failures. It transforms the validation process from a post-production manual review into a pre-production automated cycle.

This report aims to:

1. Formally define the Dispatcher abstraction and its role in the wider framework.
2. Provide a comparative mathematical modeling of the Dispatcher's behavior, specifically analyzing the trade-offs between Finite State Machines and Petri Nets [9] in representing its discrete deterministic processes.
3. Detail the concrete implementation of the Dispatcher as a backend service.
4. Analyze the efficiency of different validation strategies using empirical data, focusing on token consumption and cost optimization.
5. Derive conclusions regarding the critical importance of the Dispatcher in enabling safe, autonomous BPM systems.

2. Related Works. The DMN has emerged as the industry standard for bridging the communication gap between business analysts and technical developers. DMN provides a standardized XML-based syntax for defining decision tables and FEEL logic, allowing organizations to externalize decision rules from application code. This externalization is crucial for agility, compliance, and maintainability.

The core of DMN is the Decision Table, which maps a set of inputs to a set of outputs based on a list of rules. Crucial to the deterministic nature of DMN are Hit Policies

(e.g., Unique, Any, Priority, First), which dictate how the engine resolves scenarios where multiple rules match the input data. A violation of the Hit Policy (e.g., overlapping rules in a 'Unique' table) renders the model invalid and halts execution. The complexity of DMN lies in its combination of structural rigidity (strict XML schema validation) and expressive power (FEEL functions for string manipulation, date calculations, and list filtering).

Recent academic discourse highlights the "Complexity Wall" in manual DMN creation. As the number of input variables and rules increases, the state space grows combinatorially [4]. This "Combinatorial Explosion" exceeds the cognitive capacity of human analysts, leading to errors of omission or contradiction that are difficult to detect manually. This limitation underscores the necessity for automated generation, yet simultaneously raises the bar for the quality of that automation.

Recent research into the capabilities of Large Language Models has identified a phenomenon known as the "Struc-Bench Paradox". Study [5] indicates that while LLMs excel at generating coherent natural language, they struggle significantly with complex structured data generation. The probabilistic nature of the Transformer architecture is optimized for semantic flow and narrative coherence, not for the rigid syntactic constraints of formal languages like XML or JSON.

LLMs frequently lose track of long-range dependencies in XML structures (e.g., closing tags opened hundreds of tokens prior) or fail to maintain type consistency across a decision table. Experiments using GPT-3 for DMN generation have shown "underwhelming" results when used in a zero-shot, unconstrained manner, often failing to understand critical logical concepts such as mutual exclusivity and completeness [6]. The models may generate a table that appears correct to a human reader but fails validation due to subtle schema violations or "hallucinated" FEEL functions that do not exist in the standard specification. This necessitates a shift from simple "Prompt Engineering" to robust "Neuro-Symbolic Architectures," where the LLM is treated as a stochastic component within a larger, deterministic system.

The proposed solution aligns with the emerging field of Neuro-Symbolic AI [7, 13], which seeks to combine the learning and generative capabilities of neural networks with the reasoning and guarantees of symbolic logic. In this context, the LLM provides the "Neuro" component – the ability to translate fuzzy, unstructured intent into draft code – while the Dispatcher and the DMN Engine provide the "Symbolic" component – the verification of syntax, logic, and execution.

Research [8, 12] indicates that RAG significantly improves the factual accuracy of LLMs by grounding generation in retrieved documents, such as domain-specific policy manuals or schema definitions. Furthermore, the concept of "Self-Correction" or "Self-Healing" loops has gained traction. However, as noted in "Struc-Bench," self-correction is only effective if the external signal (the error message) is precise and the system has a strategy to utilize it effectively [15]. This report explores specifically how to orchestrate that correction loop efficiently, moving beyond simple retries to strategic regeneration.

The implementation of the Dispatcher also addresses critical human factors in AI adoption. Trust in AI systems is heavily influenced by Transparency and Reliability [10]. The "Black Box" nature of LLMs reduces trust, as users cannot see the internal reasoning process. By wrapping the LLM in a Dispatcher that validates output against explicit test cases, the system provides a powerful transparency mechanism – users can see why a model was accepted, because it passed specific tests, or why it was rejected.

Moreover, the literature suggests that user Mental Models play a crucial role in the successful deployment of AI. Users with inaccurate mental models of AI capabilities may over-rely on the system, accepting incorrect outputs without scrutiny, or under-rely on it, rejecting valid outputs due to skepticism. The Dispatcher mitigates over-reliance by acting as a hard quality gate; it simply refuses to present an invalid model to the user, thereby enforcing a baseline of reliability that fosters appropriate trust. The "Feeling of Rightness" and "Feeling of Error" are metacognitive signals that influence user reliance [11]; the Dispatcher's explicit validation reports align these feelings with the actual technical reality of the generated artifact.

3 Formalizing the Dispatcher. In the framework, the Dispatcher represents the Control Plane. The architecture separates the Request, the Generator, and the Validator. The Dispatcher sits at the intersection of these three vectors.

It functions as a feedback transducer. Current LLMs lack internal feedback loops; they generate token $t+1$ based on token t without the ability to pause, test, and retract. The Dispatcher imposes this missing loop externally, acting as the analytic layer over the generative layer.

To engineer a robust Dispatcher, we must move beyond ad-hoc scripting and strictly define its behavior

using mathematical formalisms. This allows us to prove properties about the system, such as termination, resource boundedness, and deadlock freedom. The two primary candidates for modeling discrete event systems like the Dispatcher are Finite State Machines and Petri Nets.

3.1 Finite State Machines.

A Finite State Machine is a computational model consisting of a finite number of states, transitions between those states, and inputs. Formally, a deterministic finite automaton is a 5-tuple:

$$M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$$

Where:

Q is a finite set of states (e.g., Idle, Generating, Validating, Success, Failure).

Σ is a finite set of input symbols (e.g., ReceiveRequest, GenSuccess, GenFail, ValSuccess, ValFail).

δ is a transition function QQ .

q_0 is the start state.

F is the set of accepted states.

An FSM can model the basic lifecycle of a request:

1. Start in Idle.
2. On "Receive Request", transition to Generating.
3. On "GenSuccess", transition to Validating.
4. On "ValSuccess", transition to Success (Final).
5. On "ValFail", transition back to Generating.

The limitation of the FSM becomes apparent when we introduce resources, specifically the "Retry Limit." An FSM has no internal memory of how many times it has visited a state. To model a retry limit of 5, an FSM essentially requires distinct states for each attempt. Figure 1 demonstrates a potential infinite loop in FSM representation of Dispatcher.

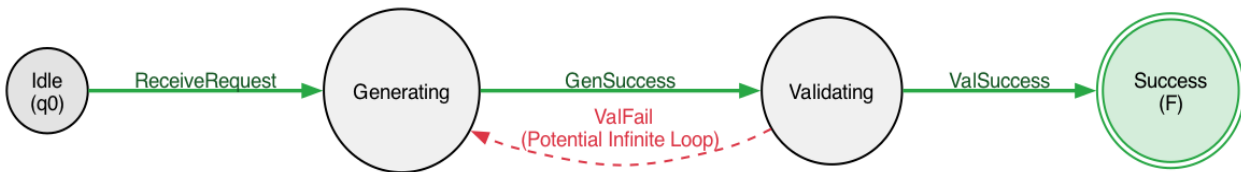


Fig. 1. Potential issue with FSM Dispatcher

The complexity of the diagram grows linearly with the magnitude of the counter. Furthermore, FSMs are inherently sequential. They cannot easily model a scenario where the Dispatcher generates the DMN and the Test Cases in parallel threads and waits for both to complete before validating.

3.2 Petri Nets.

A Petri Net is a mathematical modeling language for the description of distributed systems [9]. It is a directed bipartite graph. Formally, a Petri Net is a tuple:

$$PN = (P, T, F, W, M_0)$$

Where:

P is a finite set of Places (represented by circles). Places hold Tokens.

T is a finite set of Transitions (represented by bars/rectangles).

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ is a set of flow relations (arcs) connecting Places to Transitions and Transitions to Places.

W is a weight function (how many tokens are consumed/produced).

M_0 is the initial marking (distribution of tokens).

The Dispatcher is best modeled as a High-Level Petri Net or a Colored Petri Net, where tokens utilize values (attributes).

Places (P)

- P_{in} – Incoming Requests.
- P_{budget} – Available Retries.
- P_{gen} – The system is generating.
- P_{val} – The system is validating.
- P_{out} – final Output.

Transitions (T)

- T_{start} moves token from P_{in} to P_{gen} .

- T_{retry} consumes 1 token from P_{budget} . If P_{budget} is empty, this transition cannot fire. This natively enforces the logic: "If retries > 0, then regenerate."

- T_{abort} fires only when P_{budget} is empty and validation fails.

The fundamental constraint of the Dispatcher is the "Retry Limit" (driven by cost). Petri Nets model this naturally through the initial marking $M_0(P_{budget}) = 5$. The availability of a token in the P_{budget} place is a hard requirement for the T_{retry} transition. If the place is empty, the logic physically prevents the Dispatcher from retrying,

enforcing the "Stop-Loss" strictly without the need for external counters or state explosion.

Petri Nets natively handle concurrency. If we decide to optimize speed by generating DMN and Test Cases simultaneously, a Petri Net handles this with a "Fork" transition (one input token produces two output tokens into parallel places (e.g., P_{genDMN} and $P_{genTest}$) and a "Join" transition (which waits for tokens in both parallel places before firing). FSMs cannot model this without extreme complexity.

Petri Nets allow us to visualize the flow of the process and the accumulation of state (tokens) simultaneously.

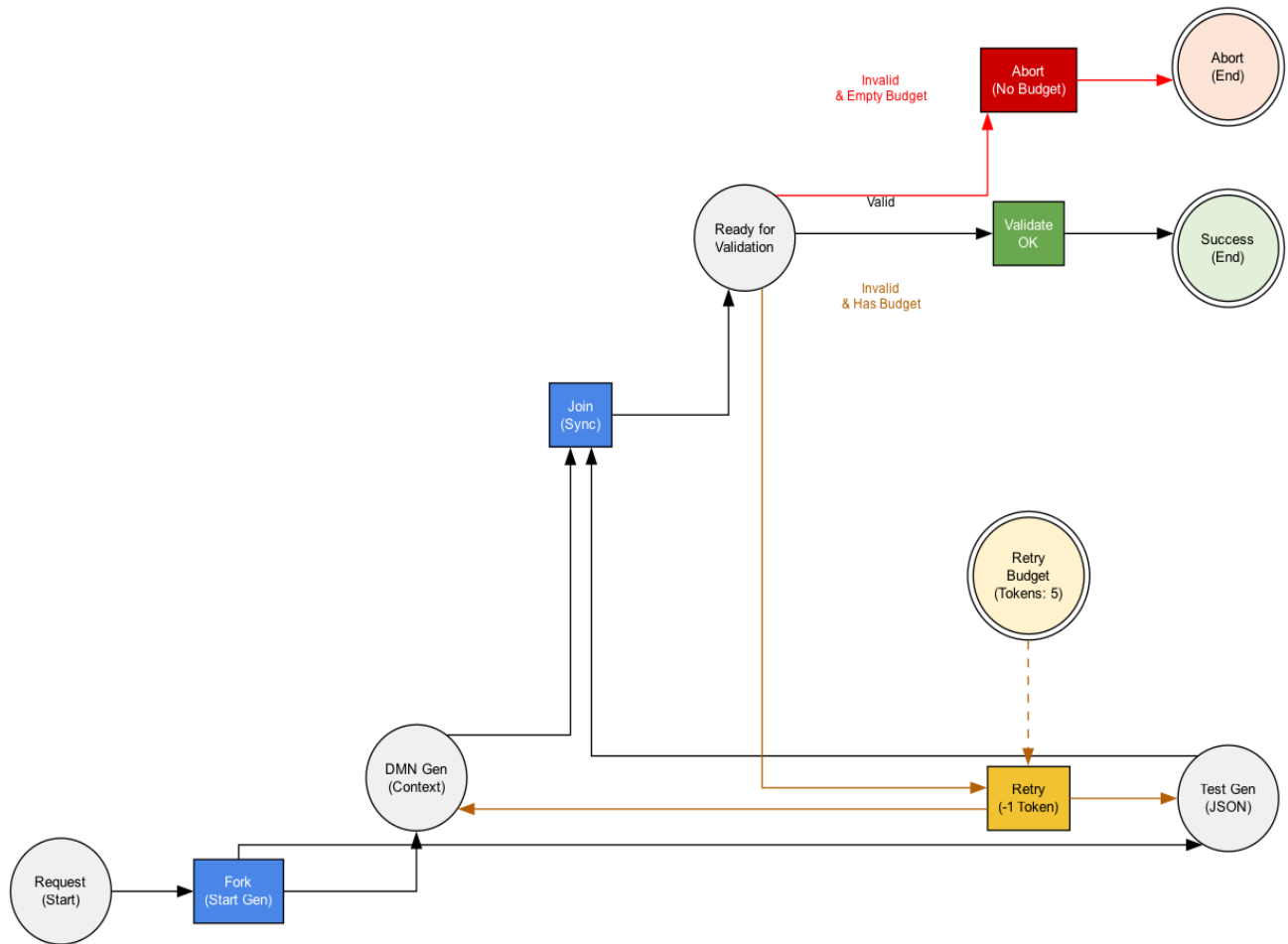


Fig. 2. Petri Net Visualisation

We can extend this to a Cost-Colored Petri Net where each transition t is associated with a cost function $C(t)$. The total cost of a trace is the summation of costs of all fired transitions. This maps directly to the economic analysis of token consumption, allowing for precise modeling of operational expenditure.

For the purpose of this framework, we define the Dispatcher as a Discrete Deterministic Process modeled by a Petri Net. This choice allows us to strictly define the state space while explicitly managing the economic constraints, represented by the budget tokens, that govern the system's operation. It provides the mathematical rigor necessary to prove that the system will eventually terminate either in Success or Exhaustion and will never enter an infinite loop of costly regeneration.

4 Dispatcher Implementation. Having defined the abstraction and the mathematical model, we now describe the Dispatcher as it exists in the current technological implementation. The architecture is designed around a "Micro-Kernel" pattern where the Dispatcher orchestrates specialized modules, ensuring separation of concerns and scalability.

4.1 Component Architecture.

The system consists of the following core modules, orchestrated by the Dispatcher shown on Figure 3.

The Dispatcher accepts the RuleSet, manages the RetryBudget, and maintains the state of the transaction. It acts as the "Single Source of Truth" for the modeling process.

Schema Injector takes the target JSON schema and injects the schema definition directly into the prompt context. This constrains the LLM's search space, preventing it from hallucinating variable names which would cause immediate validation failures.

Prompt Composer is responsible for assembling all necessary input elements into a structured prompt. It combines:

- System Instructions – syntax rules like "Return only XML" or "Do not use markdown formatting".
- Schema Context – the output from the Schema Injector.
- RAG Content external knowledge retrieved from the knowledge base (e.g., domain policies, previous successful models).
- User Rule Set the natural language description of the logic.

- Retry Context if in a retry loop, it appends the previous error log and the failed XML to guide the correction.

Generation Module is an interface to the probabilistic agent (e.g., GPT-4 or Claude 3.5 Sonnet). It handles API communication, token limits, and temperature settings. For code generation tasks, the temperature is typically set low ($T=0$ to 0.3) to minimize variance and maximize determinism.

Validator Module is a deterministic verification engine. It performs a multi-stage check:

- Syntax Checker validates against the DMN XML Schema (XSD).
- Semantic Checker parses FEEL expressions for type safety.
- Logic Checker runs the generated DMN against generated Test Cases using an embedded Camunda DMN Engine.

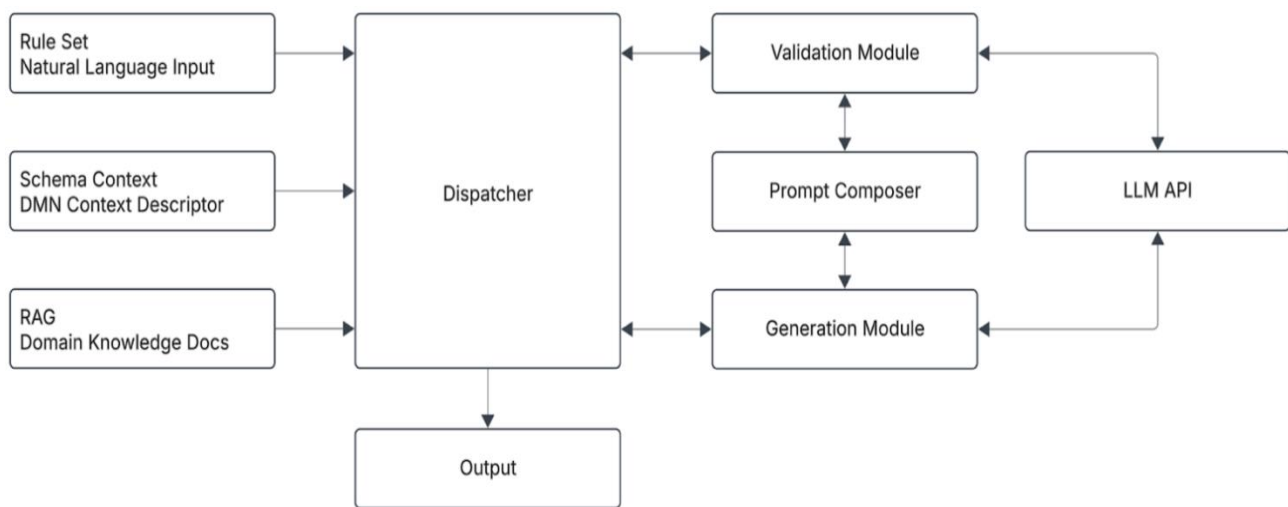


Fig. 3. Framework Structure

4.2 The Execution Flow.

The Dispatcher's execution flow orchestrates a sophisticated, multi-stage process designed to enforce reliability through a "Test-First" generation philosophy. Unlike rigorous single-shot approaches, the architecture decouples the creation of validation criteria from the generation of business logic. The process initiates when the Dispatcher receives a request and loads the relevant schema definitions. In the first phase, the Prompt Composer constructs a targeted prompt dedicated solely to generating a comprehensive set of Test Cases in JSON format. This utilizes the injected schema context and retrieved domain knowledge to ensure the tests cover edge cases before any decision logic is written.

Upon successfully receiving the structured Test Cases, the Dispatcher transitions to the second phase: DMN generation. The Prompt Composer constructs a new, distinct prompt that incorporates the user's natural language rules alongside the specific Test Cases generated in the previous step. This architectural pattern grounds the Large Language Model, effectively instructing it to write XML logic that satisfies the concrete data scenarios already defined. This significantly reduces the hallucination of

variables, as the model is constrained by the strict structure of the pre-generated test data.

Once the DMN XML is generated, the Dispatcher does not merely store the artifact but subjects it to immediate, execution-based validation. The system spins up an instance of the embedded Camunda DMN engine and executes the newly created logic against the Test Cases. This internal loop acts as the process's immune system, comparing the engine's actual computed outputs against the expected results. If the validation passes, the artifact is stamped as valid and returned to the user.

However, if a discrepancy arises – whether a syntax violation or a logical mismatch where the actual output differs from the expected – the Dispatcher triggers a convergence loop. The exact error context is captured and fed back into the subsequent generation prompt, instructing the model to debug its previous output. This iterative refinement continues until the system converges on a solution that passes all tests or until the operational Retry Budget is exhausted, ensuring the system fails fast and fixes cheaply according to the economic principles defined earlier.

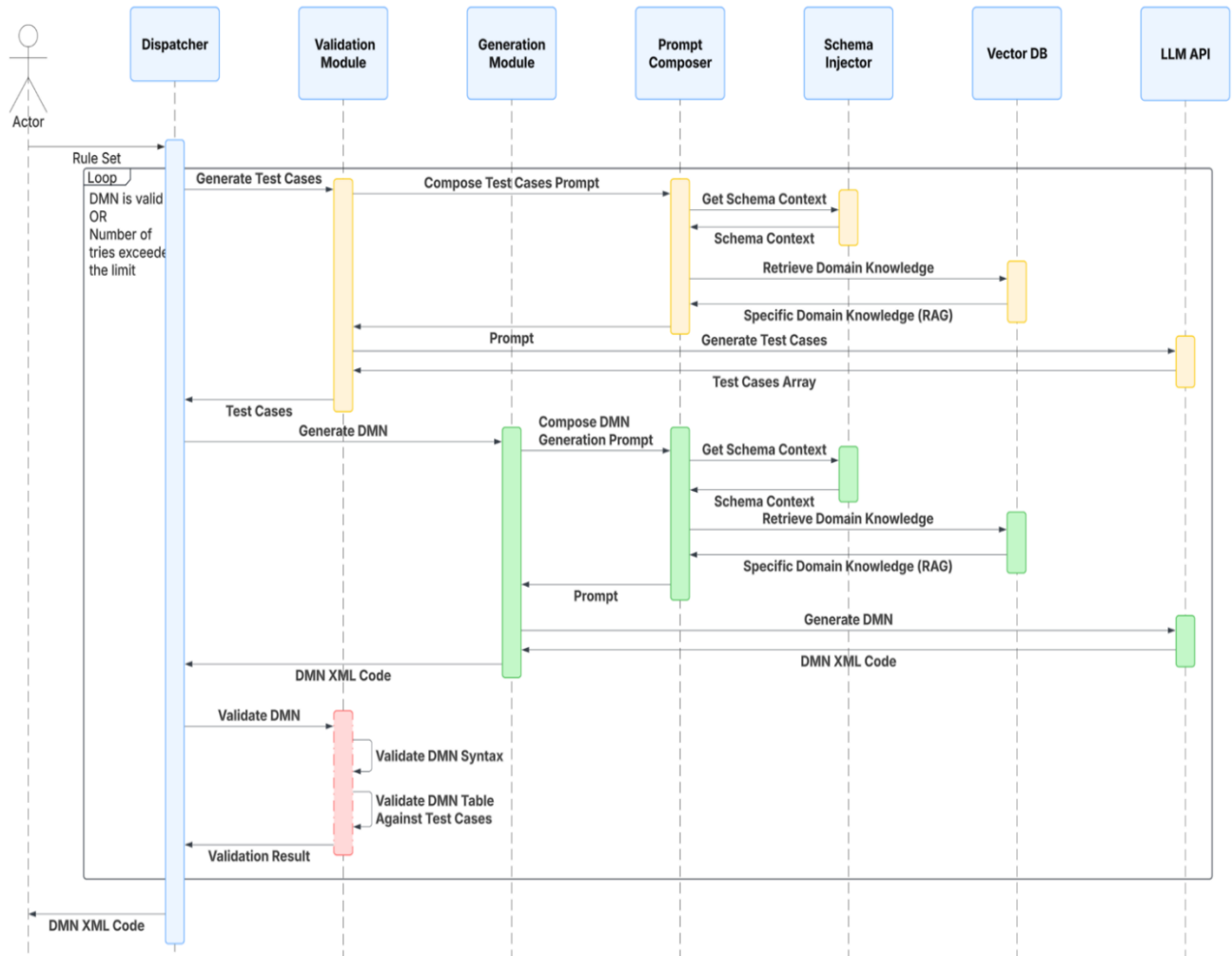


Fig. 4. Execution Sequence Diagram

4.3 Parameters and Configuration.

The Dispatcher's operation is defined by a set of organization-configured parameters. Parameters, which represent system constraints, include Max_Retries, a hard limit on the processing budget, the Model_Temperature, which determines the variance and determinism of the underlying AI model and Validation_Strategy that allows the Dispatcher to select between a fast, low-confidence "Syntax Only" check and the more rigorous, expensive, and slow "Full Semantic Execution." The current system implementation is configured to use the "Full Semantic Execution" strategy.

5 Efficiency Optimization.

The introduction of the Dispatcher effectively replaces the human labor cost with a computational resource cost. While computing is cheap, it is not free. To optimize this, we must rigorously define the cost function governed by Boehm's Law.

5.1 The Cost Function of Determinism.

We can define the cost of a single validated DMN model (C_{model}) as:

$$C_{model} = C_{gen} + \sum_{k=1}^N (C_{eval} + C_{fix})$$

Where:

C_{gen} – is the initial generation cost (Tokens In + Tokens Out).

N – is the number of retries required.

C_{eval} – is the computational cost of running the validation engine (negligible in cloud terms, but non-zero in time).

C_{fix} is the cost of the regeneration call.

Crucially, C_{fix} tends to be higher than C_{gen} because the context window grows. The "Fix" prompt must contain: (Original Rules + Original Prompt + Bad XML + Error Log + Fix Instruction). Thus, the cost of retries accelerates.

5.2 Boehm's Law and the "Stop-Loss".

Boehm's Law states that the cost of a defect grows exponentially with the phase of detection. Let $Cost_{design} = 1X$. Let $Cost_{production} = 100X$.

The Dispatcher's goal is to minimize the Total Cost of Ownership:

$$TCO = C_{model} + (P_{failure} \times Cost_{production})$$

Where $P_{failure}$ – is the probability that a defective model slips through the Dispatcher.

By implementing the Validation Loop, the Dispatcher drives $P_{failure}$ toward zero. Even if the Dispatcher spends 5x the generation cost on retries, it is strictly economically superior to releasing a bug that costs 10.

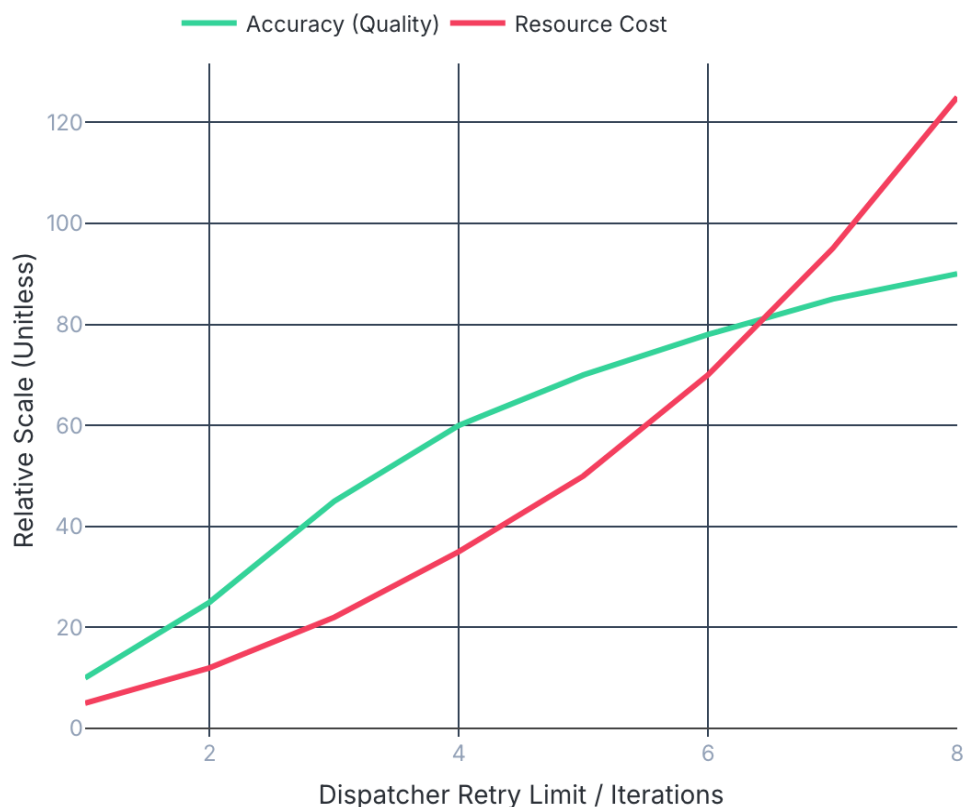


Fig. 5. The theoretical intersection of cost and quality managed by the Dispatcher

However, there is a limit. If the model fails 5 times, the probability of success on the 6th try drops significantly (diminishing returns), while the cost accumulates. The Retry Limit serves as the economic "Stop-Loss." It prevents the "Death Spiral" where the AI consumes infinite tokens trying to solve an impossible or poorly defined prompt. At $N=5$, the Dispatcher admits defeat and escalates to a human, preserving the remaining budget.

The Dispatcher tracks dependencies between resources spent and value obtained.

- Input. Time and Money (Tokens).
- Output. Accuracy (Valid DMNs) and Automation (Removal of Human).

The experimental data allows us to quantify this relationship.

6 Experimental Analysis.

We analyze the performance of the Dispatcher based on a controlled experiment comprising 200 generation cycles. The experiment compares two distinct error-recovery strategies utilized by the Dispatcher.

6.1 Experiment Setup

The modeling and experimental phase for Dispatcher optimization involved running 200 requests with a maximum limit of 5 retries. The core validation method was to execute the generated Test Cases against the corresponding DMN table. Two distinct strategies were tested for handling validation failures.

Strategy A, the "Independent" approach, mandated that upon a validation error, the Dispatcher would request a regeneration of only the DMN Table, treating the original Test Cases as the definitive "Ground Truth." In contrast, Strategy B, the "Joint/Dynamic" approach, allowed for more flexibility by instructing the Dispatcher to request a simultaneous regeneration of both the DMN Table and the Test Cases when a validation failure occurred. These strategies aimed to compare the efficiency and effectiveness of selectively regenerating components versus regenerating them together to correct discrepancies.

6.2 Quantitative Results

The user provided summary statistics for the two strategies.

Table 1 –Strategies Comparison

Metric	Strategy A (DMN Only)	Strategy B (Joint Regen)	Improvement
Total Cost (USD)	\$21.96	\$20.63	6.06% Savings
Total Tokens In	1,378,730	1,262,336	8.44% Reduction
Total Tokens Out	1,188,312	1,189,275	~0% (Neutral)
Overall Success Rate	95.5% (191/200)	100% (200/200)	4.5% Improvement

6.3 Interpretation of Results.

The experimental findings reveal a counter-intuitive outcome critical to the Dispatcher's architectural design. Initially, one might hypothesize that Strategy A would prove more economical due to the reduced text generation (only the DMN) during retry cycles. However, the data indicates a higher total cost for this approach.

Analysis of the experiment logs suggests that DMN failures frequently stem from inherent ambiguities or hallucinations in the initial generation. When the Dispatcher mandates the Language Model to rectify the DMN to align with the originally generated – and potentially flawed – test cases, the LLM encounters significant difficulty. This situation precipitates a "conflict state" wherein the logical reconciliation is unattainable. The consequence is an increased number of retries (reaching 3, 4, or 5 attempts), which inflates the consumption of Input Tokens (history) and, consequently, the overall operational cost.

In contrast, Strategy B (Joint Regeneration) provides the Dispatcher with the capability to declare: "The current logic is fundamentally inconsistent. The entire artifact must be discarded and regenerated." By executing a simultaneous regeneration of both the DMN and the Tests, the LLM is empowered to construct a new, internally coherent semantic structure. This process resolves the initial ambiguity by initiating a clean slate. The data shows that Strategy B achieves valid convergence faster (fewer retries).

Even though each retry generates more tokens (DMN + JSON), the total number of retries drops significantly enough to reduce the overall Token usage by 8.44%. The experiment logs confirm the robustness of the Dispatcher in Strategy B.

7 Discussion.

The analysis of the Dispatcher reveals broader implications for the future of AI in BPM. The Dispatcher effectively acts as an economic shield for the enterprise. By strictly enforcing Boehm's Law – catching errors when they cost \$0.10 at one retry rather than \$10,000 at one production incident. The cost of roughly \$0.10 per validated model is orders of magnitude lower than the human equivalent, which would likely exceed hundreds of dollars in billable hours for analysis and testing.

The superiority of Strategy B suggests a best practice for Neuro-Symbolic systems: Coherence over Patching. When a probabilistic model fails to produce a consistent logical structure, it is often cheaper to discard the artifact and regenerate it than to attempt iterative repairs. Strategy B effectively implements "Test-Driven Development" for AI. The model is forced to align its semantic understanding of the problem across two different modalities (JSON data and XML logic), filtering out hallucinations that would appear in only one.

From a human factors perspective, the Dispatcher serves as a "Trust Proxy." As noted in the literature, users are prone to "Automation Bias" or "Algorithm Aversion" based on their mental models of the AI's reliability. Inaccurate mental models can lead to dangerous over-reliance. The Dispatcher's strict validation regime ensures

that the system output is never a hallucination; it is either a valid model or an error message.

This work contributes to the broader field of Neuro-Symbolic AI by demonstrating a practical implementation of the Neuro → Symbolic → Neuro Architecture. The symbolic validator acts as the ground truth that guides the neural generator. This overcomes the "Struc-Bench" limitations not by making the LLM "smarter", which is expensive and uncertain, but by placing it in a system that makes it "safer." Future work should explore the integration of formal verification methods (e.g., SMT solvers) into the Validator module to provide even stronger guarantees than test-based execution.

8 Conclusion.

The Dispatcher is the keystone of the automated decision modeling framework. It transforms the integration of Large Language Models into Business Process Management from a risky experiment into a viable engineering discipline.

By abstracting the non-deterministic interactions of the AI into a discrete, deterministic process modeled by Petri Nets, the Dispatcher ensures operational stability. It manages the inherent trade-off between the cost of generation and the accuracy of the result, leveraging the logic of Boehm's Law to minimize the Total Cost of Ownership.

The experimental evidence unequivocally supports the implementation of a Dispatcher that utilizes a Joint Regeneration strategy. This approach, which prioritizes the creation of internally consistent logic-validation pairs over iterative patching, demonstrated a 6.06% reduction in cost and an 8.44% reduction in token consumption compared to traditional methods.

In conclusion, the Dispatcher validates the premise that while AI can generate the logic, it is the deterministic orchestration – the rigid framework of checks, balances, and economic limits – that creates the value. It solves the "Modeling Bottleneck" not just by working faster than a human, but by validating cheaper than a human.

References

1. Baumol, W. J. (1967). Macroeconomics of Unbalanced Growth: The Anatomy of Urban Crisis. *The American Economic Review*, 57(3), 415–426. DOI: 10.2478/ie-2023-0066.
2. Boehm, B. W. (1981). *Software Engineering Economics*. Prentice-Hall. DOI: 10.1109/TSE.1984.5010193.
3. Boehm, B. W., & Basili, V. R. (2001). Software Defect Reduction Top 10 List. *Computer*, 34(1), 135–137. DOI: 10.1109/2.962984.
4. Hasic, F., & Vanthienen, J. (2019). Complexity metrics for DMN decision models. *Computer Standards & Interfaces*, 65, 15–37. DOI: 10.1016/j.csi.2019.01.001.
5. Tang, X., Zong, Y., Phang, J., Zhao, Y., Zhou, W., Cohan, A., & Gerstein, M. (2024). Struc-Bench: Are Large Language Models Good at Generating Complex Structured Tabular Data? *Proceedings of the 2024 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL)*, 12–34. DOI: 10.18653/v1/2024.naacl-short.2.
6. Goossens, A., Vandevelde, S., Vanthienen, J., & Vennekens, J. (2023). GPT-3 for Decision Logic Modeling. *Proceedings of the 17th International Rule Challenge @ RuleML+RR 2023*, CEUR Workshop Proceedings, Vol-3485.
7. Bhuyan, B. P., Ramdane-Cherif, A., Tomar, R., & Singh, T. P. (2024). Neuro-symbolic artificial intelligence: a survey. *Neural Computing and Applications*, 36, 12809–12844. DOI: 10.1007/s00521-024-09960-z.

8. Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., Jia, K., Pan, J., & Bi, Y. (2023). Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. *arXiv preprint*. DOI: 10.48550/arXiv.2312.10997.
9. Weske, M. (2019). *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures* (3rd ed.). Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-59432-2.
10. Kaplan, A. D., Kessler, T. T., Brill, J. C., & Hancock, P. A. (2023). Trust in Artificial Intelligence: Meta-Analysis. *Human Factors*. DOI: 10.1177/00187208211013986.
11. Kaplan, A. D., Kessler, T. T., Brill, J. C., & Hancock, P. A. (2023). Trust in Artificial Intelligence: Meta-Analysis. *Human Factors*, 65(2), 337–365. DOI: 10.1177/00187208211013988.
12. Etikala, V., Van Veldhoven, Z., & Vanthienen, J. (2020). Text2Dec: Extracting Decision Dependencies from Natural Language Text for Automated DMN Decision Modelling. *Business Process Management Workshops (BPM 2020)*. Lecture Notes in Business Information Processing, 397. DOI: 10.1007/978-3-030-66498-5_27.
13. Goossens, A., De Smedt, J., & Vanthienen, J. (2023). Extracting Decision Model and Notation models from text using deep learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 211, 118667. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118667.
14. Bork, D., Ali, S. J., & Dinev, G. M. (2023). AI-Enhanced Hybrid Decision Management. *Business & Information Systems Engineering*, 65(2), 179–199. DOI: 10.1007/s12599-023-00790-2.
15. Abedi, S., & Jalali, A. DMN-Guided Prompting: A Low-Code Framework for Controlling LLM Behavior. 2025. *arXiv preprint arXiv:2505.11701*. DOI: 10.48550/arXiv.2510.16062

Received (надійшла) 14.11.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Чередніченко Ольга Юрївна (Cherednichenko Olga) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Olga.Cherednichenko@khpi.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9391-5220>.

Маляренко Владислав Вікторович (Maliarenko Vladyslav) – аспірант кафедри управління проєктами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Vladyslav.Maliarenko@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6064-061X>.

ЗМІСТ

Бушуєв С., Бушуєва Н., Бушуєв Д., Бушуєва В.

Математична модель оптимізації ланцюга створення вартості для проєктів ядерної безпеки (eng.).....3

Будюков Є. О., Лобач О. В.

Застосування штучного інтелекту в бізнес-процесах продажу ануїтетів незалежними страховими агентами..8

Кондратов О. М., Северин В. П., Попазов Д. К., Любарський С. М., Нікуліна О. М.

Використання обчислювального інтелекту для моделювання, ідентифікації, оптимізації інформаційних управляючих систем та підтримки прийняття рішень 23

Копп А. М., Дашківський Р. Б.

Про гібридну модель оцінювання якості хмарної інфраструктури (eng.)..... 30

Лисенко О. О., Кононенко І. В.

Модель вибору сторонніх інструментів в ІТ проєктах 37

Мойсєєв В. Ю., Лисенко А. О., Шуба І. В.

Розробка та оцінка ефективності інтелектуальної системи відео-інтерв'ю для асинхронного рекрутингу 47

Скрипка Б. Ю., Єльчанінов Д. Б.

Моделі та методи контролю полігрупових конфліктів інтересів в середовищі мультиагентної мережі розподіленої системи інтелектуальних агентів 62

Тимофєєв В. О., Rogovий А. І.

Сенсорні модальності для відносної локалізації кооперативних роїв БПЛА в середовищах без GNSS..... 73

Чередніченко О. Ю., Малярєнко В. В.

Диспатчер: подолання імовірнісного розриву в автоматизованому моделюванні рішень (eng.)..... 78

CONTENTS

Bushuyev S., Bushuyeva N., Bushuiev D, Bushuieva V.	
Mathematical model of value chain optimization for nuclear safety projects.....	3
Budiukov Y., Lobach O.	
The application of artificial intelligence in the annuity sales business processes of independent insurance agents	8
Kondratov O., Severyn V., Popazov D., Liubarskyi S., Nikulina O.	
Applications of computational intelligence for modeling, identification, optimization of control information systems and decision support.....	23
Kopp A., Dashkivskyi R.	
Towards hybrid cloud infrastructure quality assessment model	29
Lysenko A., Kononenko I.	
Selection model for third-party libraries in IT projects.....	37
Moiseev V., Lysenko A., Shuba I.	
Development and evaluation of the effectiveness of an intelligent video interview system for asynchronous recruitment	47
Skrypka B., Yelchaninov D.	
Models and methods for controlling multi-group conflicts of interest in a multi-agent network environment of a distributed system of intelligent agents	62
Tymofieiev V., Rogovyi A.	
Sensor modalities for relative localization of cooperative UAV swarms in GNSS-denied environments	73
Cherednichenko O., Maliarenko V.	
The Dispatcher: bridging the probabilistic gap in automated decision modeling	78

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СТРАТЕГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ, УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ,
ПРОГРАМАМИ ТА ПРОЕКТАМИ**

Збірник наукових праць

№ 2 (11) 2025

Головний редактор: Кононенко І. В., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Лобач О. В., канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Лобач О. В., канд. техн. наук, доцент

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЙ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра управління проєктами в інформаційних технологіях.
Тел.: (057) 707-68-24; *e-mail:* e.v.lobach@gmail.com
Сайт: pm.khpi.edu.ua

Обл.-вид № 2-25

Підп. до друку 30.12.2025 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний 80 г/м².
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,3. Облік.-вид. арк. 9,3.
Тираж 100 пр. Зам. № 160450. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Цифрова друкарня ТОВ «Смугаста типографія»
Ідент. код юридичної особи: 38093808
Україна; 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28 А. Тел. (057) 754-49-42