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

№ 1(12)

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 1(12)

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2026

Kharkiv
NTU "KhPI", 2026

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», 2026. № 1(12). 91 с. ISSN 2311-4738.

Вісник присвячений розгляду проблем інформаційних технологій управління розвитком компаній, територій і держав. Головна увага приділяється роботам зі створення та використання інформаційних технологій у стратегічному управлінні, управлінні портфелями, програмами, проєктами. Розглядаються питання створення методологій управління розвитком складних систем, вибору кращих методологій для застосування на конкретних об'єктах, математичного моделювання процесів і явищ, застосування математичних методів дослідження операцій, математичної статистики, штучного інтелекту, вирішення практичних задач. Окрема увага приділяється кращому досвіду застосування інформаційних технологій у стратегічному управлінні, управлінні портфелями, програмами, проєктами в різних галузях економіки.

Вісник призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, здобувачів вищої освіти відповідних спеціальностей.

The bulletin is devoted to the consideration of issues related to information technologies for managing the development of companies, territories, and states. The main focus is placed on works concerning the creation and use of information technologies in strategic management, portfolio management, program management, and project management. The publication addresses issues related to the development of methodologies for managing the development of complex systems, the selection of the most appropriate methodologies for application to specific objects, mathematical modeling of processes and phenomena, the application of mathematical methods of operations research, mathematical statistics, artificial intelligence, and the solution of practical problems. Special attention is given to best practices in the application of information technologies in strategic management, portfolio management, program management, and project management across various sectors of the economy.

The bulletin is intended for researchers, lecturers, doctoral students, and higher education students in the relevant specialties.

Ідентифікатор медія 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 та інформаційні технології; **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, 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

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

Редакційна колегія
Бушуєв Сергій Дмитрович, д-р. техн. наук, професор, Україна;
Малєєва Ольга Володимирівна, 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;
Babayev Igbal, д-р. техн. наук, професор, Азербайджан;
Kiran Sree Pokkuluri, Ph.D., професор, Індія;
Kolarov Kostadin, Ph.D., доцент, Болгарія;
Kolesnikova Kateryna, д-р. техн. наук, професор, Казахстан;
Kryvinska Natalia, д-р. техн. наук, професор, Австрія;
Melikov Agassi, д-р. техн. наук, професор, Азербайджан.

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

Executive Secretary
Lobach Olena, PhD, Ass. Professor, Ukraine

Editorial team
Bushuyev Sergey, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;
Maleeva Olga, 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;
Babayev Igbal, Dr. Tech. Sc., Professor, Azerbaijan;
Kiran Sree Pokkuluri, Ph.D., Professor, India;
Kolarov Kostadin, Ph.D., Associate Professor, Bulgaria;
Kolesnikova Kateryna, Dr. Tech. Sc., Professor, Kazakhstan;
Kryvinska Natalia, Ph.D., Professor, Slovakia;
Melikov Agassi, Dr. Tech. Sc., Professor, Azerbaijan.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ». Протокол № 4 від 27 березня 2026 р.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2026

UDC 658.5 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.1

A. ALIZADA, G. GURBANOVA, A. AFANDIYEVA

DIGITAL TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION PROJECT MANAGEMENT

The construction industry represents one of the most complex and risk-intensive sectors of the global economy, significantly contributing to national Gross Domestic Product (GDP) while simultaneously facing persistent challenges such as budget overruns, schedule delays, low productivity, and fragmented decision-making processes. Large-scale and megaprojects, in particular, frequently exceed their initial budgets and timelines due to inaccurate cost estimation, insufficient planning, unclear project scopes, and the predominance of experience-based rather than data-driven managerial decisions. In this context, digital transformation has emerged not merely as an innovation trend but as a strategic necessity for improving efficiency, transparency, and risk management in construction project management. This study investigates the role and impact of four major digital technologies—Building Information Modeling (BIM), the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and Digital Twin systems—within the lifecycle of construction projects. The research adopts a comprehensive analytical and literature-based approach, examining recent academic studies, industry reports, and global case examples to evaluate the effectiveness, implementation levels, and strategic contributions of these technologies. The findings indicate that BIM significantly enhances interdisciplinary coordination, conflict detection, visualization, sustainability analysis, and cost-time management, with the highest impact observed during early project phases where cost influence potential is greatest. IoT technologies contribute to real-time monitoring of safety conditions, environmental parameters, equipment performance, and resource utilization, thereby improving operational control and reducing on-site risks. Artificial Intelligence enables advanced data analytics, predictive modeling, and decision-support mechanisms, particularly when integrated with BIM and IoT platforms, although its adoption in construction remains comparatively limited due to data standardization and organizational barriers. Digital Twin systems extend beyond static modeling by establishing real-time synchronization between physical assets and digital replicas, allowing continuous lifecycle optimization and performance monitoring. The study concludes that the integrated application of BIM, IoT, AI, and Digital Twin technologies forms a synergistic digital ecosystem capable of transforming construction project management into a data-driven, predictive, and strategically optimized discipline. Despite existing challenges such as traditional management culture, fragmented data structures, and resistance to change, the adoption of digital technologies is essential for reducing project risks, improving productivity, and enhancing global competitiveness in the construction industry.

Keywords: Construction, Technology, BIM, IoT, AI, Digital Twin.

А. АЛІЗАДА, Г. ГУРБАНОВА, А. АФАНДІЄВА

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ БУДІВЕЛЬНИМИ ПРОЄКТАМИ

Будівельна галузь є однією з найскладніших і найбільш ризикоємних сфер світової економіки, роблячи значний внесок у національний валовий внутрішній продукт (ВВП) та водночас стикаючись із постійними проблемами, такими як перевищення бюджету, затримки у виконанні графіків, низька продуктивність і фрагментованість процесів прийняття рішень. Великомасштабні проєкти та мегапроєкти особливо часто перевищують початкові бюджети й терміни реалізації через неточне оцінювання вартості, недостатнє планування, нечітке визначення обсягу робіт і переважання управлінських рішень, заснованих на досвіді, а не на даних. У цьому контексті цифрова трансформація постає не просто як інноваційна тенденція, а як стратегічна необхідність для підвищення ефективності, прозорості та якості управління ризиками в будівельних проєктах. У цьому дослідженні розглядається роль і вплив чотирьох ключових цифрових технологій – інформаційного моделювання будівель (BIM), Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та систем цифрових двійників – протягом усього життєвого циклу будівельного проєкту. Дослідження базується на комплексному аналітичному та оглядовому підході, що включає аналіз сучасних наукових публікацій, галузевих звітів і міжнародних практичних прикладів з метою оцінки ефективності, рівня впровадження та стратегічного внеску цих технологій. Отримані результати свідчать, що BIM суттєво покращує міждисциплінарну координацію, виявлення колізій, візуалізацію, аналіз сталості та управління вартістю й термінами, причому найбільший вплив спостерігається на ранніх етапах проєкту, коли потенціал впливу на витрати є найвищим. Технології IoT забезпечують моніторинг у реальному часі умов безпеки, параметрів довкілля, роботи обладнання та використання ресурсів, що сприяє підвищенню операційного контролю та зниженню ризиків на будівельному майданчику. Штучний інтелект дозволяє здійснювати розширену аналітику даних, прогнозне моделювання та підтримку прийняття рішень, особливо за умови інтеграції з платформами BIM і IoT, хоча його впровадження у будівництві залишається відносно обмеженим через проблеми стандартизації даних та організаційні бар'єри. Системи цифрових двійників виходять за межі статичного моделювання, забезпечуючи синхронізацію фізичних об'єктів із їхніми цифровими копіями в режимі реального часу, що дозволяє здійснювати безперервну оптимізацію життєвого циклу та моніторинг ефективності. У підсумку встановлено, що інтегроване застосування технологій BIM, IoT, AI та цифрових двійників формує синергетичну цифрову екосистему, здатну трансформувати управління будівельними проєктами у керовану даними, прогнозну та стратегічно оптимізовану систему. Незважаючи на наявні виклики, зокрема традиційну управлінську культуру, фрагментовані структури даних і опір змінам, впровадження цифрових технологій є необхідною умовою для зниження проєктних ризиків, підвищення продуктивності та зміцнення глобальної конкурентоспроможності будівельної галузі.

Ключові слова: будівництво, технології, BIM, IoT, штучний інтелект, цифровий двійник.

1. Introduction. The construction industry is a sector characterized by dynamic and complex procedures, the involvement of diverse resources and supply chains, the influence of external factors such as weather conditions, and the execution of unique, time-constrained projects [1]. Due to the participation of multiple engineering disciplines in the planning, design, construction, and management of projects, the construction sector can account for approximately 3–30% of a country's Gross Domestic Product (GDP), depending on the scale of activities [2]. As buildings represent the primary output of this large-scale sector, the total global building floor area exceeded 260 billion square meters during 2023–2024 [3]. Considering that the majority of this share belongs to developed countries, the significant influence of the construction industry on the global economy becomes evident.

© A. Alizada, G. Gurbanova, A. Afandiyeva, 2026

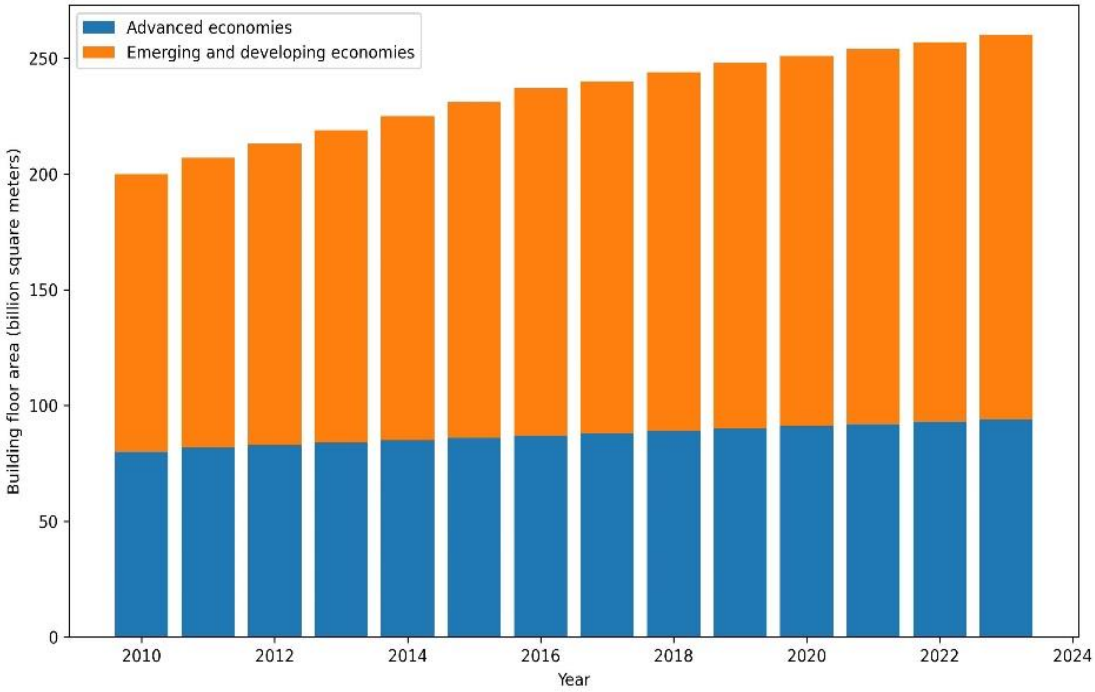

Fig.1. Building floor area vs Year [3]

On the other hand, projects executed within such a large-scale sector involve substantial risks. While a successful construction project is defined as one completed within the allocated budget, specified timeframe, and required quality standards, particularly large-scale projects often face high levels of risk throughout their lifecycle due to the complexity of management procedures. In many cases, these risks directly contribute to project failure. According to McKinsey analyses, cost overruns in megaprojects frequently reach up to 80% of the initial budget [4], meaning that a project planned with a budget of USD 1 billion may ultimately cost USD 1.8 billion. Additionally, such megaprojects are completed on average 20 months later than planned [4], which directly contributes to unsuccessful project outcomes.

Several key factors can be identified as the primary causes of construction project failure. Research indicates that inaccurate cost estimates, improper planning, unclear project scopes, and the lack of skilled labor are among the main reasons for unsuccessful project completion [5]. These factors may affect projects at different stages and with varying degrees of severity. Regardless of the specific cause, the common underlying reason for failure is the adoption of incorrect decisions by project managers. Decisions made without data-driven analysis and instead based solely on personal or corporate experience play a critical role in construction projects, and the execution of incorrect decisions directly impacts project success.

To minimize risks arising from human-related decision-making processes, the application of digital technologies has become a necessity in the construction sector. Although construction is traditionally considered a conservative industry, studies show that data-driven decision-making can reduce project budgets by 5–10% and improve planning efficiency by 10–20% [6]. Given the direct influence of cost and planning factors on project success, the adoption of modern trends such as data analytics has become inevitable. Moreover, digital technologies contribute positively to improving work quality, enabling tasks to be completed in shorter periods with lower energy and resource consumption [7]. Considering these factors, the application of digital technologies—particularly artificial intelligence, big data, and related modern tools—plays an indispensable role in reducing risks and increasing success rates in construction projects.

2. Digital Technologies in Construction Project Management

2.1. Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling (BIM) is defined as a collaborative, interdisciplinary management approach that enables the systematic collection, coordination, and management of information throughout the entire lifecycle of a construction project, including planning, design, construction, operation, maintenance, and demolition [8]. Initially emerging as a concept in the 1970s and 1980s, BIM systems were first practically implemented in Hungary in 1982 through the ArchiCAD software. With the advancement of computer technologies in the 1990s, BIM adoption in real projects increased, reaching a significant milestone in 2000 with the introduction of Revit. BIM technology ensures transparent and efficient communication among architectural, structural, and MEP disciplines, allowing conflicts and inconsistencies to be identified and resolved before the construction phase begins [8].

Advantages of BIM technology	Peculiarity	Efficiency Increase
Conflict detection	Identifies potential conflicts prior to construction to reduce site modifications and rework	89.14%
Visualization and 3D modeling	Helps project managers intuitively understand the design and construction process	87.02%
Sustainability analysis	Supports analysis of building energy efficiency and sustainability factors	84.57%
Continuous updates/records	Constantly updated throughout the lifecycle to provide data for future management	83.21%
Cost and time management	Allows more accurate prediction of costs and timelines, optimizing resources	78.36%
Facility management	Helps maintenance and operations teams manage buildings efficiently	75.03%
Collaborative work	Promotes collaboration and improves communication efficiency	72.98%

Fig.2. The effect of BIM in the construction project management [9]

The results indicate that the highest efficiency improvement is observed in conflict detection (89.14%), enabling early identification of design clashes and reducing rework during construction. Visualization and 3D modeling (87.02%) and sustainability analysis (84.57%) support more intuitive and data-driven decision-making processes. Continuous data updates and records (83.21%) facilitate effective lifecycle management, while cost and time management (78.36%), facility management (75.03%), and enhanced collaboration (72.98%) highlight BIM's strategic value in optimizing resources and improving team coordination. Overall, these findings confirm that BIM systems serve as highly effective tools in construction project management.

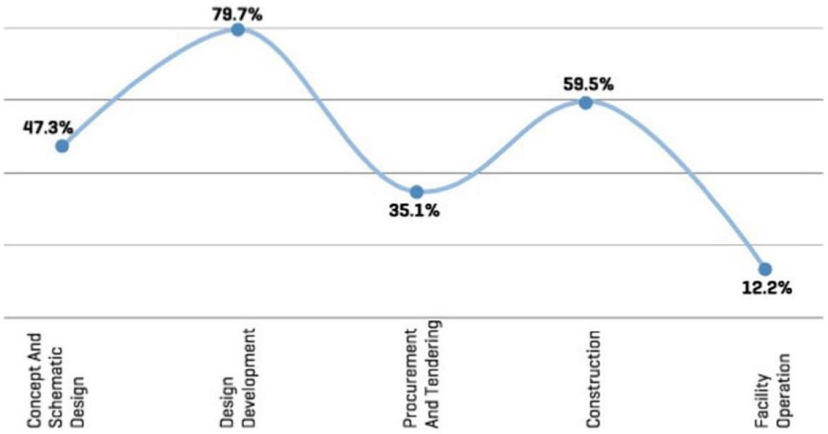

Fig.3. Effect of BIM in different construction stages [10]

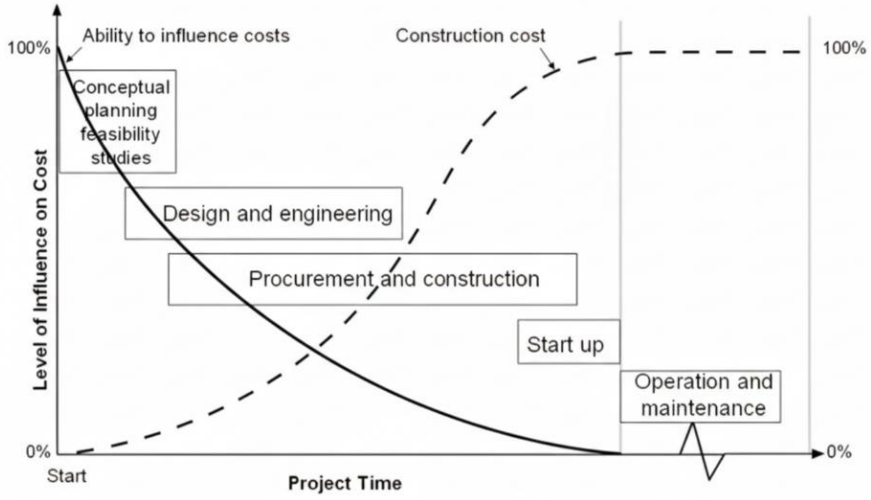

Fig.4. Ability to influence cost in project life-cycle [10]

The presented graphs reveal a direct relationship between BIM utilization across project stages and the ability to influence costs [10]. Figure 4 shows that BIM application reaches its peak during the design phase (79.7%) and declines to its minimum during the operation phase (12.2%), which strategically aligns with the cost influence curve shown in Figure 3. While cost-saving opportunities are highest during early project stages such as conceptual planning and design, they decrease significantly as construction progresses. Consequently, the high BIM adoption rate during design and engineering phases plays a critical role in protecting the overall project budget, whereas its limited use during operation indicates untapped potential for long-term cost optimization.

2.2. IoT

The Internet of Things (IoT) is a global network system that enables physical and digital objects to communicate through shared standards [11]. IoT systems, implemented through sensors, applications, and various tools, offer unique approaches to construction project management [12]. In one study, IoT sensors were deployed on an active construction site to monitor workers' use of Personal Protective Equipment (PPE). Workers entering hazardous zones without PPE were alerted through sensors, preventing potential accidents [13]. In another study, sensors installed in underground construction sites detected oxygen deficiency and toxic gas levels, triggering warning sirens to prevent accidents [14]. When integrated with BIM, IoT tools enable continuous site monitoring, real-time progress tracking, and data-driven decision-making. Given the critical nature of lifecycle decisions, IoT technologies hold vital importance in construction management. IoT technologies are now widely applied on a global scale, contributing significantly to project management efficiency. Figure 5 presents commonly used IoT systems in international construction projects.

Project / Case Study	Country / Company	Applied IoT Technology	Brief Description
Hudson Yards	USA (New York)	IoT sensors (HVAC, elevators, lighting)	Used to monitor energy efficiency and structural integrity of infrastructure components.
FIFA 2022 Stadiums	Qatar	Smart helmets and sensors	Real-time monitoring of workers' health and environmental conditions.
Volvo Electric Site	Sweden	Autonomous IoT sensor-equipped machinery	Monitoring equipment performance, fuel consumption, and maintenance requirements.
DPR Construction – Office	USA (San Francisco)	IoT sensors (lighting, temperature, humidity)	Optimizes energy consumption and indoor comfort levels within the office environment.
Crossrail (Elizabeth Line)	United Kingdom (London)	IoT sensor-based tunnel devices	Enables predictive maintenance by monitoring equipment conditions.
Procore IoT Platform	USA (New York)	Procore (IoT platform)	Monitoring equipment utilization, material logistics, and project communication.
Trimble Connect – Bridge Project	USA (Boston)	Trimble Connect IoT platform	Real-time monitoring of structural integrity.
Autodesk BIM 360 Project	USA (Chicago)	BIM–IoT integration	Combined use of IoT and BIM for subcontractor workflow and document management.
Fieldwire – Residential Construction	USA (Miami)	Fieldwire (IoT platform)	Monitoring work schedules, worker performance, and safety compliance.
Skanska UK – Drones + IoT	United Kingdom	IoT-enabled drones	Site monitoring, safety management, and resource optimization.
Kier Group – Asset Tracking	United Kingdom	IoT-based tracking system	Real-time tracking of equipment and materials.

Fig 5. IoT systems used in construction projects [15]

2.3. Artificial Intelligence

Artificial Intelligence (AI) refers to a set of advanced algorithms and systems that simulate human intelligence to analyze data, identify patterns, and automate decision-making processes [16]. First formalized as a scientific discipline at the Dartmouth Conference in 1956, AI demonstrated strategic reasoning capabilities in the late 1990s through IBM's Deep Blue chess computer. Since the 2010s, the rise of big data and neural networks has marked a renaissance in AI development [17]. The emergence of generative AI models, particularly those based on transformer architectures, has transformed AI from a purely analytical tool into an active participant in creative processes.

Despite the growing adoption of AI, the construction sector significantly lags behind other industries in implementing AI technologies within entrepreneurial systems. As illustrated in Figure 6, while information and communication sectors exhibit the highest AI adoption rates in 2025, construction ranks lowest [18]. This highlights the sector's reliance on traditional methods and suggests that AI integration could lead to transformative improvements.

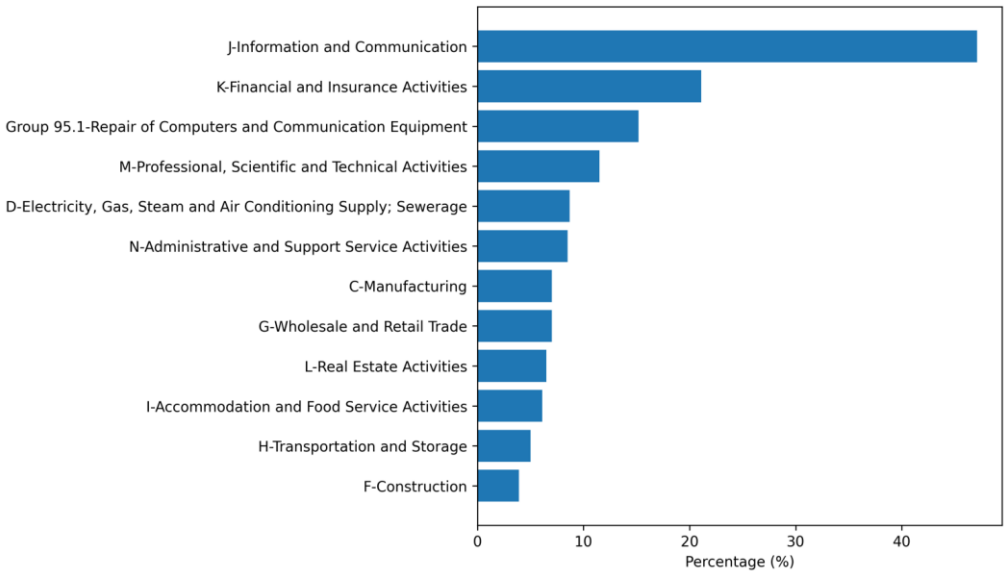

Fig 6. AI application statistics in entrepreneurship industries [18]

AI applications in construction have been explored across multiple disciplines, demonstrating benefits in project planning, cost estimation, site monitoring, and related areas [19]. Particularly when integrated with BIM, AI becomes a powerful tool; however, limitations arise due to non-standardized data, incomplete construction information, shortages of skilled personnel, and organizational resistance. In the future, overcoming these barriers through the combined application of BIM, IoT, and AI may enable AI systems to become reliable partners across nearly all phases of construction projects, especially as effective tools for project managers.

2.4. Digital Twin

Digital Twin technology represents a living, continuously evolving digital replica of a physical construction project, moving beyond static BIM models and synchronizing with real-world conditions in real time [20]. A digital twin consists of three core components: the physical object, its digital counterpart, and the data streams connecting them.

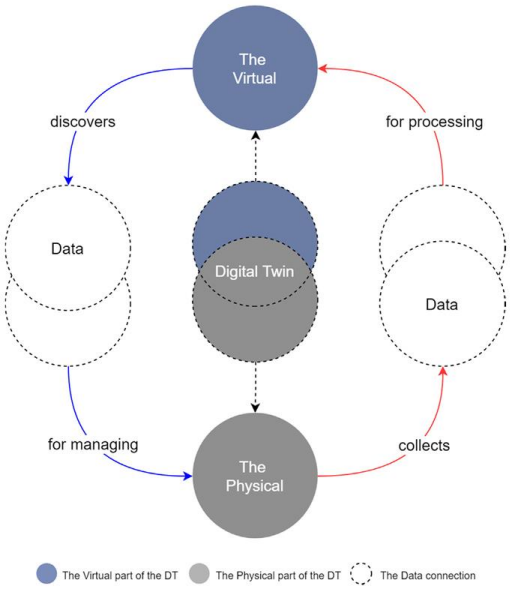

Fig 7. Digital twin procedure [20]

Although digital twin systems share conceptual similarities with BIM, the key distinction lies in real-time synchronization. While BIM provides a static visual representation, digital twins reflect continuously changing project conditions. Through the integration of AI, IoT, and other digital tools, digital twin technology enables real-time analysis of construction progress, actual costs, delays, and other critical parameters, leading to transformative improvements in project management. Despite these advantages, widespread adoption remains limited due to challenges similar to those faced by other digital technologies.

Project Name	Estimated Budget	Completion / Status	Purpose of Using Digital Twin
NEOM / The Line (Saudi Arabia)	~USD 500 billion	Ongoing (phased completion, post-2030)	City-scale digital twin for design simulations, construction logistics, environmental analysis, infrastructure performance, and long-term smart city operations with AI and IoT integration.
Crossrail / Elizabeth Line (UK)	~USD 24 billion (≈ £18.8 billion)	2022	BIM integration with real-time data for progress tracking, clash detection, construction coordination, and operational transition in a complex transport system.
New Istanbul Airport (Turkey)	~USD 22 billion	2018 (operational phases ongoing)	Simulate construction sequencing, manage large-scale logistics, optimize spatial planning, and support operational readiness by connecting design models with performance data.
Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (China)	~USD 18.8 billion	2018	Structural monitoring using digital twins for stress, vibration, and maintenance planning across one of the world's longest sea-crossing bridges.
Heathrow Airport Expansion / Terminal 5 (UK)	~USD 24–49 billion	2008 (Terminal 5), expansion ongoing	Digital twin for simulating passenger flow, operational logistics, construction phasing, and long-term airport management.

Fig 8. Construction projects which used digital twin systems [21]

3. Conclusion. The conducted analyses indicate that the application of digital technologies in construction project management is no longer an alternative approach but a strategic necessity. In an industry characterized by cost overruns, schedule delays, and high risk levels, technologies such as BIM, IoT, Artificial Intelligence, and Digital Twins enable data-driven decision-making across planning, execution, and operation phases, thereby minimizing risks. BIM's early-stage application maximizes cost influence, while IoT and AI systems provide real-time monitoring and predictive analytics for project optimization.

However, the construction sector's lag in adopting these technologies reflects its dependence on traditional management approaches, non-standardized data structures, and organizational resistance. In the future, the integration of BIM, IoT, AI, and Digital Twin technologies is expected to form a foundational framework for construction project management. Ultimately, digital transformation will enable the execution of larger-scale projects with reduced risk, enhancing the sector's global competitiveness.

Referances

1. Dallasega P., Rauch E., Linder C. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. *Computers in Industry*. 2018, vol. 99, no. 1, pp. 205–225. doi: 10.1016/j.compind.2018.03.039
2. Cuellar S., Grisales S., Castaneda D. I. Constructing tomorrow: A multifaceted exploration of Industry 4.0 scientific, patents, and market trend. *Automation in Construction*. 2023, vol. 156, article 105113. doi: 10.1016/j.autcon.2023.105113
3. *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25: Not just another brick in the wall*. 2025. Available at: https://globalabc.org/sites/default/files/2025-03/Global-Status-Report-2024_2025.pdf
4. Changali S., Mohammad A., Van Nieuwland M. *The Construction Productivity Imperative*. 2015. Available at: https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/The%20construction%20productivity%20imperative/The%20construction%20productivity%20imperative.pdf
5. H. E., O. E. Project failure factors and their impacts on the construction industry: A literature review. *The International Conference on Civil and Architecture Engineering*. 2014, vol. 10, no. 10, pp. 1–20. doi: 10.21608/iccae.2014.44191
6. Li F., Laili Y., Chen X., Lou Y., Wang C., Yang H., Gao X., Han H. Towards big data driven construction industry. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023, vol. 35, article 100483. doi: 10.1016/j.jii.2023.100483
7. RICS. *Digitalisation in construction report 2023*. 2023. Available at: https://www.rics.org/news-insights/digitalisation-in-construction-report
8. Marzouk M., Elsaay H., Othman A. A. E. Analysing BIM implementation in the Egyptian construction industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021, ahead-of-print. doi: 10.1108/ecam-07-2020-0523
9. Yang X. Construction Project Management Method Based on BIM Technology. 2024, pp. 314–320. doi: 10.1145/3718751.3718801
10. Das K., Khursheed S., Paul V. K. The impact of BIM on project time and cost: insights from case studies. *Discover Materials*. 2025, vol. 5, no. 1. doi: 10.1007/s43939-025-00200-2
11. *Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges, and Recent Research Directions*. ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/320532203_Internet_of_Things_IoT_Definitions_Challenges_and_Recent_Research_Directions.
12. Shvets Y., Hanák T. Use of the Internet of Things in the Construction Industry and Facility Management: Usage Examples Overview. *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 219, pp. 1670–1677. doi: 10.1016/j.procs.2023.01.460
13. Kanan R., Elhassan O., Bensalem R. An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. *Automation in Construction*. 2018, vol. 88, pp. 73–86. doi: 10.1016/j.autcon.2017.12.033
14. Cheung W.-F., Lin T.-H., Lin Y.-C. A Real-Time Construction Safety Monitoring System for Hazardous Gas Integrating Wireless Sensor Network and Building Information Modeling Technologies. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 2, article 436. doi: 10.3390/s18020436
15. A-Team Global. *Building Tomorrow: Unleashing the Power of IoT in the Construction Industry*. 2023. Available at: https://a-team.global/blog/building-tomorrow-unleashing-the-power-of-iot-in-the-construction-industry/

16. Stryker C., Kavlakoglu E. What is artificial intelligence (AI)? *IBM*. 2024. Available at: https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence
17. Mijwil M. M. History of Artificial Intelligence. *ResearchGate*. 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322234922_History_of_Artificial_Intelligence
18. Turkish Statistical Institute. *Survey on the use of information technologies in enterprises, 2025*. 2025. Available at: https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Girisimlerde-Bilisim-Teknolojileri-Kullanim-Arastirmasi-2025-54012
19. Gültekin B., Doğan G. İnşaat Mühendisliğinde Yapay Zekâ Çalışmaları [Artificial intelligence studies in civil engineering]. *ResearchGate*. 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/358410578_Insaat_Muhendisliginde_Yapay_Zeka_Calismalari
20. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*. 2020, vol. 114, article 103179. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179
21. Ramadan A. Building the future: How digital twins are revolutionizing the construction industry. *PlanRadar*. 2023. Available at: https://www.planradar.com/sa-en/digital-twins-transforming-construction-industry/
22. Alizada A., Gurbanova G. Artificial intelligence technologies in construction projects. *Proceedings of the I International Conference on Current Problems in Engineering and Applied Sciences*. UNEC, 2025, p. 276.

Received (надійшла) 02.01.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Asiman Alizada – Master student of Project Management Department, Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan; e-mail: asiman.alizada21@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8838-6678.

Gulnar Gurbanova – Assoc. Prof., Dr., Department of Project Management, Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan; e-mail: gurbanovagulnar86@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9150-2447.

Aytakin Afandiyeva – Assoc. Prof., Dr., Department of Project Management, Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan; e-mail: aytek@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7271-3345.

UDC 331.5:005.332:316.72 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.2

K. SEMENCHUK

INTERCULTURAL COMPETENCIES AS A FACTOR OF PROJECT TEAM EFFECTIVENESS: THE CASE STUDY OF GERMANY

Migration processes, driven by socio-economic and geopolitical transformations in recent years, have significantly influenced labor markets in European Union countries and highlighted the need for effective integration of foreign workers. This issue has become particularly acute since 2022 due to the large-scale displacement of people from Ukraine, posing challenges for host countries, primarily Germany, not only to ensure employment quantitatively but also to achieve sustainable and high-quality professional integration. Despite the increasing employment rates of Ukrainian refugees, quantitative indicators do not fully reflect the actual level of professional adaptation, team effectiveness, or long-term career mobility. This article examines intercultural competencies as a critical factor for successful project team performance and as a key resource for the professional integration of Ukrainian migrants into the German labor market. It is argued that the effectiveness of collaboration in multicultural environments depends not only on professional qualifications and language proficiency but also on social-behavioral skills, adaptability, empathy, tolerance, and the ability to interact constructively with colleagues and management. The theoretical foundation of the study is based on contemporary approaches to intercultural competence analysis, particularly Jürgen Bolten's concept, which defines it as a dynamic combination of personal, social, and functional-strategic components manifested through interaction in teams and professional activities. The practical implementation of these competencies is analysed through the example of the forwarding and logistics sector in Germany, characterized by high operational complexity and the need for integration of professional, cognitive, language, and intercultural skills. The study demonstrates that formal competency assessments, including professional tests, language tasks, and exercises in logic and analytical thinking, allow for an objective evaluation of Ukrainian specialists' readiness to work in a structured and multicultural professional environment.

Keywords: competence, project team, Ukrainian migrants, German labor market, forwarding and logistics

К. Л. СЕМЕНЧУК

МІЖКУЛЬТУРНІ КОМПЕТЕНЦІЇ ЯК ФАКТОР ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПРОЄКТНИХ КОМАНД: ПРИКЛАД НІМЕЧЧИНИ

Міграційні процеси, зумовлені соціально-економічними та геополітичними трансформаціями останніх років, суттєво вплинули на структуру ринків праці країн Європейського Союзу та актуалізували питання інтеграції іноземних працівників. Особливої значущості ці процеси набули після 2022 року у зв'язку з масовим переміщенням населення з України, що поставило перед приймаючими державами, насамперед Німеччиною, завдання забезпечення не лише кількісного працевлаштування, а й якісної та стійкої інтеграції мігрантів у професійне середовище. Попри зростання рівня зайнятості українських фахівців, кількісні показники не завжди відображають реальний рівень професійної адаптації, ефективності участі у проєктних командах та здатності до довгострокової кар'єрної мобільності. У статті досліджено міжкультурні компетенції як ключовий чинник успішності командної взаємодії та важливий ресурс професійної інтеграції українських мігрантів на німецькому ринку праці. Аргументовано, що ефективність роботи в мультикультурному середовищі залежить не лише від фахової підготовки та мовної компетентності, а й від рівня сформованості соціально-поведінкових навичок, здатності до адаптації, емпатії, толерантності та вміння конструктивно взаємодіяти з колегами та менеджментом. Теоретичною основою дослідження є сучасні підходи до аналізу міжкультурної компетентності, зокрема концепція Юргена Болтена, яка визначає її як динамічну сукупність особистісних, соціальних та функціонально-стратегічних компонентів, що проявляються у процесі взаємодії в команді та професійній діяльності. Практичну реалізацію цих компетенцій проаналізовано на прикладі сфери експедирування та логістики в Німеччині, де робота характеризується високою операційною складністю та потребує поєднання професійних, когнітивних, мовних та міжкультурних навичок. Показано, що формалізоване оцінювання компетентностей, включно з професійними тестами, мовними завданнями та завданнями на логіку й аналітичне мислення, дозволяє об'єктивно визначити готовність українських фахівців до роботи в мультикультурному та структуровано організованому середовищі.

Ключові слова: компетентність, проєктна команда, українські мігранти, ринок праці Німеччини, експедирування та логістика.

Introduction. Migration processes driven by socio-economic and geopolitical transformations of recent years have had a significant impact on the labor markets of the European Union (EU) countries. These processes intensified markedly after 2022 due to the mass forced displacement of the population from Ukraine, which brought the issues of integration and adaptation of migrants and refugees into the socio-economic systems of host countries to the forefront. In this context, migrant employment goes beyond purely economic indicators and acquires an interdisciplinary character, combining aspects of labor economics, sociology, management, and intercultural communication.

Germany, as one of Europe's leading economies and a primary destination country for migrants, is of particular interest for studying professional activity in a multicultural environment and identifying the competencies required for effective interaction within project teams. On the one hand, the German labor market offers considerable opportunities for the integration of foreign workers; on the other hand, it is characterized by structural and cultural factors that affect professional adaptation, employment quality, and the long-term sustainability of migrant integration.

At the same time, there is growing recognition that successful employment and effective performance in multicultural teams depend not only on formal factors such as legal status, education level, or language proficiency, but also on the level of intercultural competencies developed by all participants in the labor process. This concerns not only migrants themselves, but also employers, managers, team members, and institutional intermediaries whose interaction shapes the actual working environment.

Purpose. The purpose of this article is to examine

© K. Semenchuk, 2026

intercultural competencies within project teams and the specific features of migrant employment in EU countries, using Germany as a case study.

To achieve this objective, the following tasks were addressed:

- to analyse the role of intercultural competencies in ensuring the effectiveness of project team performance;
- to summarize J. Bolten's model of intercultural competencies and substantiate its applied relevance;
- to demonstrate the interrelation between professional, linguistic, and intercultural competencies using the logistics sector as an example.

Analysis of recent research. Empirical studies exist that measure and assess intercultural competencies in teamwork, for example through developed scales such as TWC-CQ, demonstrate that different components of these competencies (behavioral, motivational, cognitive) have varying effects on the competitiveness of team members in culturally diverse environments [1].

Special attention in the literature is given to cross-cultural team-building practices in Europe [2], where intercultural interaction is viewed as a factor enhancing productivity, creative potential, and innovative thinking within project teams. This includes both normative-theoretical models and practical methods for creating inclusive environments adapted to cultural differences among participants.

Article [3] analyses the importance of intercultural communicative competence in virtual and face-to-face teamwork during the COVID-19 period. The authors apply quantitative methodologies to identify patterns of teamwork in culturally diverse projects and teams.

Study [4] examines the impact of cultural diversity on the effectiveness of international project teams. The author argues that while cultural diversity can enhance teams' innovative potential, in the absence of adequate intercultural competencies it may also complicate communication and coordination. Key factors for ensuring team effectiveness include adaptability, intercultural communication, and inclusive management approaches.

The authors of study [5] emphasize that integrating specialized training programs and team learning practices enables participants to interact more effectively in international project environments, which is particularly relevant for migrant adaptation in labor markets. Overall, this body of research highlights the importance of purposeful development of intercultural competencies for increasing productivity and reducing the risk of misunderstandings in multicultural teams, which is directly relevant to the study of Ukrainian migrant integration into the German labor market.

In addition, research on supply chain strategies in project activities [6] complements the intercultural competence discourse by highlighting the role of coordination, communication, and decision-making in complex project environments. In international logistics and supply chains, these processes inherently involve cross-cultural interaction, which underscores the indirect importance of intercultural competencies for project team effectiveness.

This academic seminar [7], conducted by Prof. S. Hajatpour at FAU, focuses on the role of intercultural competencies in labour market integration processes. The course analyses how cultural awareness, communication styles, institutional norms, and individual adaptive capacities influence migrants' professional inclusion in Germany. The materials provide a conceptual and practice-oriented perspective that complements empirical studies on intercultural competence by emphasising its relevance for employment structures and organisational contexts in multicultural labour markets.

Main content. As of October 2025, approximately 4.3 million people in the EU had received temporary protection due to the war in Ukraine [8]. Germany remained the largest host country: by the end of the most recent reporting period, approximately 1.2 million individuals were benefiting from temporary protection status in Germany (around 1,218–1,229 thousand persons).

An analysis of labor market integration dynamics shows a noticeable acceleration in the employment of Ukrainian citizens in Germany during 2022–2025. At the initial stage of mass displacement (summer–autumn 2022), the employment rate among the working-age population (approximately 20–64 years) was low, at around 16%. In 2023, the average rate increased to approximately 22%, and by early 2024 it had risen further to about 27% [9]. The most recent studies indicate that by summer 2025, the employment rate among Ukrainian refugees aged 20–64 who arrived during the first months of the war reached approximately 51%, indicating substantial progress over a three-year period. However, the share of unemployed individuals and those temporarily unavailable for the labor market (due to childcare responsibilities, integration courses, or retraining) remains significant, suggesting continued potential for further integration.

The rising employment rate of Ukrainian refugees in EU countries, particularly in Germany, reflects gradual structural integration into national labor markets. At the same time, quantitative employment indicators do not fully capture the complexity of economic integration, as employment stability, professional mobility, and job-qualification matching largely depend on non-financial and intangible factors. One of the key factors is the level of intercultural competencies, which determine migrants' ability to interact effectively in multicultural work environments, adapt to institutional and communicative norms of the host country, and establish professional relationships with employers and colleagues.

In a contemporary context where artificial intelligence increasingly assumes routine tasks, the question arises as to which skills make project team members truly indispensable and unique. Beyond technical expertise, the importance of soft skills - skills rooted in human experience, intuition, and interpersonal competence - is steadily increasing [10]. These skills not only enhance the effectiveness of teamwork during project implementation but also constitute a competitive advantage in the labor market. The article [11] emphasises

the role of linguistic distance and language competence as key factors of labour market integration, which constitute an integral component of intercultural competence.

Key soft skills required for participants in international teams are outlined below (Table 1). A central role in this context is played by intercultural competence - the ability to interact effectively with representatives of different cultures - which constitutes a critical professional skill in a globalized environment (Fig. 1).

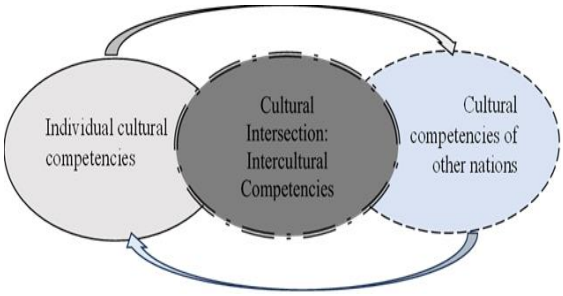

Fig. 1. Formation of intercultural competence in project team collaboration

Intercultural competence includes cultural awareness, sensitivity, communication abilities, adaptability, respect, and empathy. Project team members are required to act interculturally competently, understand cultural differences among participants, avoid misunderstandings, and build sustainable relationships with all stakeholders.

Intercultural competence is formed by a set of interrelated components, including empathy; tolerance and openness; communicative ability, understood as culturally sensitive, respectful, and clear communication; language competence; self-reflection, defined as awareness of one's own cultural influence; flexibility and adaptability; as well as teamwork skills and the ability to manage and resolve conflicts.

These competencies are not innate but can be developed through education, targeted training, and personal experience. Teams formed with consideration of cultural diversity possess a significant potential for enhanced creativity and the generation of innovative solutions. Diverse backgrounds and different ways of thinking contribute to a broader perspective on contemporary challenges, which positively affects a team's problem-solving capacity, increases project productivity, and enhances the overall adaptability and effectiveness of organisations.

Intercultural competence within project teams also helps to prevent stereotyping and fosters the emergence of unique insights, as well as a supportive and inclusive working atmosphere in which diversity of opinions and experiences is valued. It emphasizes the importance of respect for individual differences among team members and the ability to find common ground even in complex conflict situations. Figure 1 illustrates the intersection between one's own cultural competencies and those of other cultures, where intercultural competence emerges at this boundary.

Intercultural competence becomes particularly relevant in the context of military hostilities in Ukraine, when a significant share of specialists is forced to integrate into the labour markets of other countries. Under such conditions, the ability to interact effectively with representatives of different cultures becomes critical for unlocking the potential of diverse teams and achieving the strategic objectives of organisations.

Table 1 – Key professional competencies and their scientific rationale in project team performance

№	Competency	Core Aspects	Scientific Rationale	Project Team Application
1	Emotion Intelligence	Self-awareness; self-regulation; empathy; social skills	A high level of emotional intelligence enhances interpersonal interaction and team productivity	Ensures effective communication, prevents conflicts, and supports team morale
2	Creativity	Thinking outside of the box; generating unconventional ideas; willingness to experiment; interdisciplinarity	Creativity is key for innovation processes, enabling the development of new approaches and solutions to complex problems	Promotes idea generation, process optimization, and innovative solutions within the project
3	Critical Thinking	Information analysis; source evaluation; rational approach; evidence-based decisions	Ensures accurate assessment of information and improves decision-making based on facts	Helps objectively evaluate project data, make informed decisions, and minimize risks
4	Adaptability	Openness to new experiences; positive attitude towards change; lifelong learning	Enables effective responses to technological and social changes	Provides flexibility in managing project changes and rapid adaptation to new conditions
5	Communication skills	Persuasiveness; active listening; nonverbal communication; transparency	Facilitates conflict avoidance, increases work productivity, and improves collaboration quality	Ensures clear information exchange, reduces misunderstandings, and improves team coordination
6	Teamwork	Team orientation; constructive conflict resolution; responsibility	Enables achieving collective goals, effective task distribution, and enhances group performance	Supports interaction among team members, ensures collective task completion, and achieves shared collective results
7	Leadership Competencies	Leading by example; motivational abilities; decision-making skills	Contributes to organisational stability, boosts team motivation, and enhances decision-making quality	Helps coordinate team work, motivate participants, and make timely project decisions
8	Intercultural Competence	Openness and respect; adaptability to cultural context; cultural awareness	Ensures effective interaction in a globalized environment and minimizes cultural misunderstandings	Promotes productive collaboration among team members with diverse cultural backgrounds, strengthening team

In the research of the German scholar Jürgen Bolten, intercultural competence is understood not as a set of isolated knowledge about other cultures, but as a dynamic complex of individual, social, and strategic capabilities that are realized through interaction. This approach is especially relevant for analysing the

professional integration of Ukrainian migrants into the German labour environment, which is characterized by a high level of cultural diversity and clearly structured organisational norms.

Figure 2 summarizes J. Bolten's approach to structuring intercultural competencies, which is based on their integrated and process-oriented nature. The model reflects the interrelation between the personal, social, and functional–strategic dimensions of intercultural competence. The personal dimension includes such characteristics as openness, empathy, and tolerance of ambiguity; the social dimension encompasses skills of intercultural communication, teamwork, and conflict management; the functional–strategic dimension refers to the ability to apply intercultural knowledge in professional activities and decision-making processes.

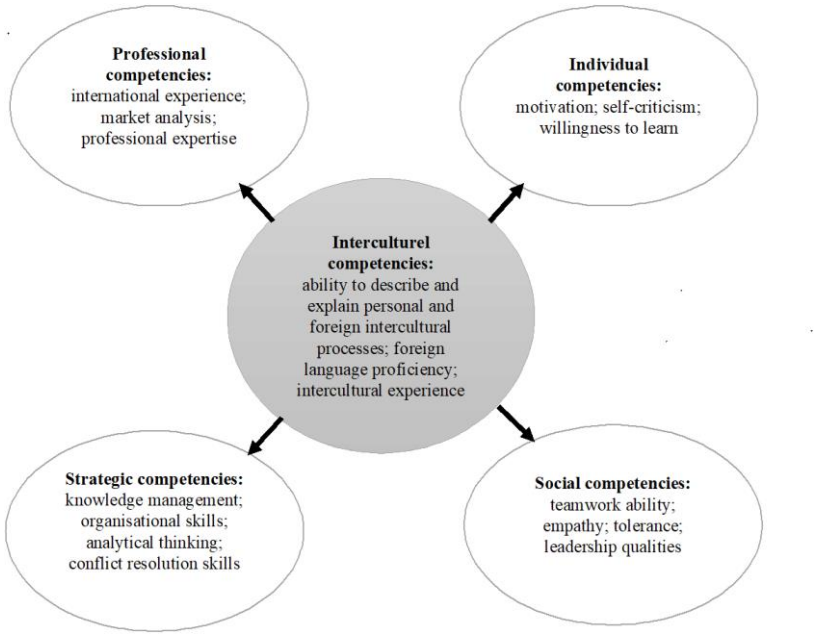

Fig. 2. Intercultural competencies according to J. Bolten: classification of competency types

The application of this model to the analysis of the integration of Ukrainian migrants into the German labor market makes it possible to consider intercultural competencies as a key resource for successful professional adaptation in a multicultural working environment.

Among the sectors of the German labor market—such as elderly care, cleaning services, warehouse operations, and tax consulting - a stable demand for qualified personnel is also observed in the field of freight forwarding and logistics. This sector is characterized by high operational complexity and a strong need for specialists with interdisciplinary competencies. Logistics and freight forwarding represent a particularly illustrative professional environment in which the combination of professional expertise, language proficiency, and intercultural competencies directly determines employment opportunities for Ukrainian professionals in Germany. The specific nature of logistics activities requires a comprehensive assessment of competencies, encompassing professional, analytical, linguistic, and intercultural components. In practice, these competencies are manifested through compliance with business communication standards, accuracy in fulfilling contractual obligations, and effective interaction with partners from diverse cultural backgrounds.

Professional competencies in logistics are assessed through concrete operational skills, including the calculation of transportation costs, the application of Incoterms, route planning, delivery time control, preparation of transport and customs documentation, as well as the use of digital logistics systems such as Transportation Management Systems (TMS) and Enterprise Resource Planning (ERP) systems. These competencies form the foundation of the daily professional activities of a freight forwarder in Germany.

Language and communication competencies have clear practical relevance and include conducting business correspondence in German, negotiating by phone with carriers, coordinating terms with clients, and interacting with financial institutions. Insufficient language proficiency directly affects service quality and may result in financial losses.

Analytical and cognitive competencies are applied when working with tariffs, currency transactions, assessing route profitability, and resolving non-standard situations such as delays, cargo damage, or changes in transportation conditions. Logical and visual thinking are essential for rapid information processing under time constraints.

Intercultural competencies are expressed through adherence to German standards of business conduct,

including punctuality, clarity of agreements, written confirmation of decisions, and a well-defined hierarchy of responsibility. For Ukrainian specialists, this implies adapting communication styles and organisational behavior while maintaining professional autonomy.

A practical example illustrates the effectiveness of a competency-based approach to employment in logistics and freight forwarding. The author of the article successfully completed a comprehensive qualification test in German with a score of 87%. The test consisted of 100 tasks to be completed within 100 minutes and assessed professional logistics knowledge, mathematical and analytical skills, proficiency in German and English, understanding of financial and banking operations, as well as logical and visual reasoning abilities. This standardized assessment format enables employers to objectively evaluate a candidate's professional and intercultural readiness for work in the German logistics environment. The obtained result confirms not only the presence of applied competencies but also the ability to function effectively in conditions of linguistic, organisational, and cultural diversity, which constitutes a key requirement of the contemporary German logistics services market.

Thus, passing a comprehensive competency assessment serves as an instrument for the objective verification of various types of competencies. Among these, intercultural competence is integrated with professional and cognitive skills and directly influences the prospects of successful employment of Ukrainian specialists in the freight forwarding and logistics sector in Germany.

Conclusions. The employment situation of Ukrainian migrants in Germany indicates gradual integration into the national labor market: by the end of October 2025, more than 1.2 million individuals were under temporary protection, and the employment rate among the working-age population had increased to 51%. At the same time, effective participation in project teams and the sustainability of professional integration depend not only on the level of professional expertise and language skills but also on the development of intercultural competencies. These include adaptability, cultural awareness, empathy, tolerance, and the ability to engage in constructive interaction.

In the multicultural environment of logistics and freight forwarding, these competencies are realized through adherence to professional and communication standards, precision in fulfilling obligations, and efficient coordination with partners from different cultural backgrounds. The formation of such competencies occurs through practical experience, specialized training, and formalized assessment procedures that integrate professional, cognitive, and interpersonal skills. The achieved test result of 87% confirms the formation of the necessary professional, linguistic, and cognitive competencies, enabling effective task performance within the German logistics market, which is characterized by high requirements for accuracy, responsibility, and intercultural interaction.

Therefore, the combination of intercultural, linguistic, and professional competencies forms a solid foundation for the effective integration of Ukrainian specialists into the German professional environment and minimizes the risks of communication failures within project teams.

References

1. Zhang, X.-Y., Zhu, X.-G., Tu, J.-C., & Yi, M. (2022). Measurements of intercultural teamwork competence and its impact on design students' competitive advantages. *Sustainability*, 14(1), 175. https://doi.org/10.3390/su14010175
2. Kaljuzhna, Y., Cherep, A., Voronkova, V., Cherep, O., & Ivanov, S. (2024). European techniques of team formation based on cross-cultural interaction: Experience of EU countries. *Humanities Studies*. https://doi.org/10.32782/hst-2024-20-97-27
3. Yousef, K. (2024). Intercultural communicative competence in virtual and face-to-face teamwork: A quantitative analysis of culturally diverse teams. *Organizacija*, 57(2), 139–150. https://doi.org/10.2478/orga-2024-0010
4. Andrienko, T., Genin, V., & Kozubska, I. (2021). Developing intercultural business competence via team learning in the post-pandemic era. *Advanced Education*, 8(18), 53–69. https://doi.org/10.20535/2410-8286.214627
5. Eurostat. (2025). Temporary protection for 4.3 million people in October 2025. *Eurostat News*. European Commission.
6. Chernova, L., & Semenchuk, K. (2023). *Research of supply chain strategies in project activities*. In Proceedings of the 8th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry (DTESI 2023) (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3680). https://ceur-ws.org/Vol-3680/S4Paper15.pdf
7. Hajatpour, S. *Intercultural competencies and labour market integration* [Lecture materials]. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).
8. Federal Employment Agency. (2025). Nearly 300,000 people from Ukraine are working in Germany. *Press Release*. Bundesagentur für Arbeit.
9. Semenchuk, K. L. (2020). Agile project management by Agile specialists. *Development of Management and Entrepreneurship Methods in Transport*, 2(71), 90–101. https://doi.org/10.31375/2226-1915-2020-2-90-101
10. Bolten, J. (2020). Rethinking intercultural competence. In G. Rings & S. Rasinger (Eds.), *The Cambridge Handbook of Intercultural Communication* (pp. 56–67). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108555067.005
11. Bar-Haim, E., & Birgier, D. P. (2024). *Language distance and labor market integration of migrants: A gendered perspective*. PLOS ONE, 19(4), e0299936. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299936

Received (надійшла) 27.01.2026

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Семенчук Катерина Леонідівна (Semenchuk Kateryna Leonidivna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проєктами, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; e-mail: katarix@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1808-448X

UDC 614.84:519.87:004.8 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.3

M. YUNUSOV

HYBRID MODELING METHODOLOGY FOR PREDICTING RISKS IN EMERGENCY MANAGEMENT

This research addresses the critical challenge of forecasting natural and man-made emergency situations, with a specific focus on industrial and forest fire dynamics. Traditional emergency management often relies on deterministic models that, while physically accurate, struggle to incorporate the inherent stochasticity of environmental variables. Conversely, purely statistical approaches frequently fail to account for unique, non-linear scenarios where historical data is insufficient. To bridge this gap, this paper proposes a robust hybrid modeling methodology that integrates fundamental physico-mathematical equations with advanced probability theory methods. The core of the deterministic component is based on the parabolic partial differential equation of heat conduction, which describes the thermal evolution of objects under stress. To account for real-world uncertainties, environmental parameters such as wind speed and ambient temperature are treated as random variables, modeled using Weibull and Gaussian distributions respectively. A comprehensive computational experiment was conducted using the Monte Carlo simulation method, executed via Python-based algorithms to perform 10,000 iterations for dynamic fire risk assessment. The Finite Difference Method (FDM) was employed to solve the heat transfer equations iteratively. The results indicate that while a static deterministic model predicts a failure time of 24.5 minutes, the hybrid approach reveals a significant stochastic variance, with failure times ranging from 15 to 45 minutes. Notably, the model identified a "Tail Risk" where 5% of the simulations resulted in failure within less than 18 minutes—a critical safety window that traditional models overlook. Furthermore, a counter-intuitive physical correlation was observed where higher wind speeds occasionally delayed failure due to enhanced convective cooling effects. This methodology provides a more realistic and granular tool for decision-makers in emergency management, offering not just a single risk value but a comprehensive probability interval essential for life-saving evacuation planning.

Keywords: Emergency situations, hybrid modeling, risk prediction, Monte Carlo method, Weibull distribution, fire safety.

М. М. ЮНУСОВ

МЕТОДОЛОГІЯ ГІБРИДНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ У СФЕРІ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Дане дослідження присвячене вирішенню критичної проблеми прогнозування природних і техногенних надзвичайних ситуацій з особливим акцентом на динаміку промислових і лісових пожеж. Традиційне управління надзвичайними ситуаціями часто покладається на детерміновані моделі, які, будучи фізично точними, важко враховують властиву стохастичність екологічних змінних. Навпаки, суто статистичні підходи часто не в змозі врахувати унікальні нелінійні сценарії, де історичних даних недостатньо. Щоб подолати цей розрив, у даній роботі пропонується надійна методологія гібридного моделювання, яка інтегрує фундаментальні фізико-математичні рівняння з передовими методами теорії ймовірностей. Ядро детермінованого компонента базується на параболічному диференціальному рівнянні теплопровідності в частинних похідних, яке описує термічну еволюцію об'єктів під навантаженням. Для врахування невизначеностей реального світу екологічні параметри, такі як швидкість вітру та температура навколишнього середовища, розглядаються як випадкові величини, змодельовані з використанням розподілів Вейбулла та Гаусса відповідно. Комплексний обчислювальний експеримент було проведено з використанням методу моделювання Монте-Карло, реалізованого за допомогою алгоритмів на базі Python для виконання 10 000 ітерацій для динамічної оцінки ризику пожежі. Метод скінченних різниць (FDM) використовувався для ітераційного розв'язання рівнянь теплопередачі. Результати показують, що в той час як статична детермінована модель передбачає час відмови 24,5 хвилини, гібридний підхід виявляє значну стохастичну дисперсію з часом відмови від 15 до 45 хвилин. Зокрема, модель ідентифікувала «хвостовий ризик» (Tail Risk), де 5% симуляцій призвели до збою менш ніж за 18 хвилин — критичне вікно безпеки, яке традиційні моделі ігнорують. Крім того, спостерігалася контрінтуїтивна фізична кореляція, коли вищі швидкості вітру іноді затримували руйнування завдяки посиленим ефектам конвективного охолодження. Ця методологія забезпечує більш реалістичний і детальний інструмент для осіб, які приймають рішення в управлінні надзвичайними ситуаціями, пропонуючи не просто єдине значення ризику, а повний інтервал ймовірності, необхідний для планування евакуації та захисту населення. Практичне впровадження цієї гібридної моделі дозволяє значно підвищити надійність систем раннього попередження в умовах високої невизначеності навколишнього середовища.

Ключові слова: надзвичайні ситуації, гібридне моделювання, прогнозування ризику, метод Монте-Карло, розподіл Вейбулла, пожежна безпека, теплопровідність, стохастичні змінні.

Introduction. In the contemporary era, the backdrop of global climate change, rapid urbanization processes, and the increasing pace of industrialization have led to the complex dynamics of emergency situations. Forecasting the development scenarios of such risks and implementing preventive measures play a crucial role in emergency management. All the aforementioned issues necessitate the enhancement of traditional mechanisms for emergency risk management.

Reports from the United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate that the rise in average global temperatures has resulted in an increase in hydrometeorological events and large-scale forest fires.

Research conducted in this field utilizes deterministic methods based on physical laws and stochastic methods based on statistical databases for the assessment of emergency risks (Drysdale, 2011; Zio, 2013). The propagation of natural emergencies, expressed through differential equations, is typically presented via deterministic models in existing studies. However, in practical application, such models often treat input parameters-such as wind speed, humidity, and the heat of combustion of an object-as constants, thereby failing to reflect random variables in a real environment. On the other hand, considering the approach to Dynamic Quantitative Risk Assessment (DQRA), the variation of emergency risks over time is characterized by its stochastic nature (F. Khan, 2016).

It is worth noting that while traditional physical-mathematical models—specifically differential equations that calculate the spread of fires and inundation zones

© M. Yunusov, 2026

during floods—are characterized by high accuracy, the significant time required to process large datasets may lead to delays in operational decision-making. Meanwhile, statistical methods based on historical data struggle to predict real-world events effectively. For this reason, the vastness and rapid fluctuation of databases necessitate the development of hybrid models incorporating artificial intelligence technologies for real-time parameter processing.

Main body. The theoretical basis of the research is built upon key pillars: the dynamics of emergency situations, system reliability, stochastic modeling, and dynamic risk analysis. Recent studies and scientific innovations in these fields have led to a significant evolution in the methodology of forecasting dynamic disaster risks. It is particularly important to note that there are two main directions in disaster risk modeling: deterministic and stochastic (Drysdale, 2011; Zio, 2013). Recently, the number of studies on dynamic and hybrid models has increased.

Deterministic Models. The use of differential equations based on physical laws is considered traditional in the analysis of the propagation of natural emergencies. Heat transfer equations are utilized in the investigation of emergencies such as fire events (Drysdale, 2011). Such models account for existing field parameters to determine fire ignition rates. However, these approaches assume parameters such as wind speed, humidity, and other characteristics to be constant, failing to incorporate environmental variability into the model. Consequently, risk assessment is conducted based on a standard scenario. In practice, the random variation of many parameters limits the reliability of deterministic models. Furthermore, such methods rely on approximate simulations and do not deviate from the constraints established by the scenario.

Stochastic Models. Stochastic risk analysis utilizes methods that encompass probability parameters, thereby accounting for the uncertainty between parameters and real events. Reliable assessment of such risks requires the consideration of a multitude of possible scenarios for the intended processes (Zio, 2013). To achieve this, probabilistic risk assessment methods are employed. In probabilistic risk assessment, parameters are treated as random variables, and various probabilistic scenarios are processed via Monte Carlo simulations. Such a risk assessment process must be conducted over many possible cases, making it possible to detect system failure parameters and determine the distribution of risk values (Zio, 2018).

Dynamic and Hybrid Models. Dynamic risk assessments are developed to address the potential limitations of both deterministic and stochastic methods. Unlike traditional approaches, Dynamic Risk Assessment (DRA) accounts for the temporal variation and updating of risk levels (Khan et al., 2016). Furthermore, the advancement of Quantitative Risk Assessment (QRA) has facilitated the emergence of dynamic methods (Villa et al., 2016). These novel approaches aim to establish a risk profile through continuous observation and monitoring in real-time. Consequently, dynamic risk models can stochastically determine potential risks by considering not only the initial period of the intended process but also its subsequent evolution. Simultaneously, hybrid models integrate both aforementioned approaches—physical laws and probabilistic calculations. For this reason, hybrid modeling approaches are considered effective in risk assessments, as they account for both thermophysical laws and dynamic conditions within the same time interval.

In large-scale natural fire scenarios, the transfer of heat energy from the external environment to a combustible object, and subsequently into its interior, constitutes the fundamental physical process. For the mathematical description of such a process, a parabolic partial differential equation based on the law of heat conduction and the law of conservation of energy is utilized (Drysdale, 2011):

$$\rho C_o \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right) + Q_{general}, \quad (1)$$

where:

ρ – density of the object's material (kg/m^3);

Co – specific heat capacity of the material (J/kg*T);

k – thermal conductivity (W/(m·T));

T(x,t) – temperature field depending on spatial (x) and temporal (t) coordinates;

t – time (s);

x – thickness of the object's wall (m);

$Q_{general}$ – internal heat source (W/m3), (typically assumed to be 0).

Boundary conditions play a decisive role in solving the equation. Thus, the heat exchange at the external boundary of the combustible object (x=0) is taken as the primary basis. In this instance, the value of the heat flux consists of the sum of two main components: radiation and convection (Ricci et al., 2023):

$$-k \frac{dy}{dx}\int_{x=0} = q''_{net} = q''_{rad} + q''_{conv}, \quad (2)$$

- Radiative heat flux q''_{rad} thermal radiation resulting from the direct heat flux generated during natural fires;

- Convective heat flux q''_{conv}: heat exchange resulting from air movement via wind, described as follows:

$$q''_{conv} = h_c(T_{env} - T_{surf}), \quad (3)$$

where:

h_c – convective heat transfer coefficient ((W/(m2·T));

T_{env} - ambient air temperature (T);

T_{surf} – temperature of the object's external surface (T(0,t)).

Modeling of Uncertainties. Although v and Tenv (ambient temperature) are assumed to be constant in deterministic models, since they are random variables in a real environment, determining the Probability Density Functions (PDF) of these parameters is essential for predicting disaster risks.

Research conducted in the fields of meteorology and wind energy has revealed that the Weibull distribution models the probability distribution of wind speed most accurately (Carta et al., 2009):

$$f(v;k,c) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(\frac{v}{c})^k}, \quad (4)$$

where:

$v \geq 0$ – wind speed (m/s);

k – shape parameter indicating wind variability (dimensionless);

c – scale parameter (correlated with the mean wind speed).

The distribution of air temperature is modeled according to the Gaussian distribution:

$$f(T;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

where:

μ – mean temperature (°C);

σ – standard deviation (°C).

Monte Carlo Simulation. Monte Carlo simulation is utilized to establish the working mechanism of dynamic hybrid models. Through a large number of random samples, this method allows for obtaining the probability distribution results of the deterministic model's output parameters (e.g., the time required for the object's temperature to reach the most critical limit) (Zio, 2013).

The main steps for constructing the algorithm are as follows:

1. Definition of Input Parameters (Input):

- Material properties (ρ, Co, k);
- Geometric dimensions (L);
- Fire scenario (q''_{rad});
- Critical temperature;
- Distribution parameters ($k_{weibull}$, $c_{weibull}$, μ_{temp}, σ_{temp}).

2. Random Sampling:

- Generation of v_i and $T_{env,i}$ values from the Weibull and Gaussian distributions for N simulation iterations

3. Loop calculation (Iterative process):

- For eahc i-th iteration (i=1…N):
- v_i calculation hc,i based on v_i;
- Solve the heat conduction equation for (T(x,t) sonlu using the finite difference method;
- Monitor temperature of the object's inner surface (T_{inner});
- if $T_{inner} \geq T_{fail}$, record the time tfail,i and terminate the loop.

4. Analysis of obtained results:

- Calculate statistical indicator of the obtained tfail (mean value, standard deviation, quantiles);
- Construct the Cumulative Distribution Function (CDF) of the probability of failure;
- Conduct "Tail risk" analysis.

To implement the proposed methodology practically, an extensive computational experiment was conducted within the environment provided by the Python programming language. Python's libraries for numerical computing, statistical distributions, and visualization offer a favorable platform for achieving the aforementioned objectives.

For the experiment, a potential fire incident in the industrial zones of the Republic of Azerbaijan was simulated. The algorithmic description of the codes used for the simulation is presented in Figure 1 and Figure 2.

As can be seen in Figure 1 and Figure 2, as a result of 10,000 simulation iterations, several fundamental and counter-intuitive regularities in emergency risk management were revealed. The obtained results were analyzed from both statistical and physical perspectives and compared with the "static" risk approach.

```
import numpy as np
from scipy.stats import weibull_min, norm

# Number of simulations
N_SIM = 10000

# 1. Generation of Stochastic Variables
# Wind speed (m/s) - Weibull distribution
wind_speeds = weibull_min.rvs(c=2.2, scale=8.5, size=N_SIM)

# Ambient temperature (K) - Normal distribution
# 30C mean, 5C standard deviation -> Conversion to Kelvin
ambient_temps_C = norm.rvs(loc=30, scale=5, size=N_SIM)
ambient_temps_K = ambient_temps_C + 273.15
```

Fig. 1. Introduction to Python algorithm for Monte Carlo simulation and solving the thermodynamic equation

```python
import numpy as np

def solve_heat_equation(v_wind, T_amb, q_rad, props):
    # Unpacking parameters
    rho, cp, k, L, T_crit = props

    # Calculation of convection coefficient (Empirical correlation)
    # h_c = 5.7 + 3.8 * v (exemplary simplified formula)
    h_c = 5.7 + 3.8 * v_wind

    # Space and Time discretization
    nx = 20        # Number of nodal points
    dx = L / nx
    alpha = k / (rho * cp)
    dt = 0.5 * dx**2 / alpha  # Stable time step (Fourier number = 0.5)

    # Initial condition: Wall is at ambient temperature
    T = np.ones(nx + 1) * T_amb

    time = 0
    max_time = 3600 * 2 # Maximum 2 hours simulation
```

```python
  while time < max_time:
      T_new = T.copy()

      # Internal nodes (Conduction equation)
      for i in range(1, nx):
          T_new[i] = T[i] + alpha * dt / dx**2 * (T[i+1] - 2*T[i] + T[i-1])

      # Boundary Conditions
      # x=0 (Outer surface): Radiation + Convection
      # q_net = q_rad + h_c * (T_amb - T_surface)
      # Update of boundary temperature via energy balance
      q_net = q_rad + h_c * (T_amb - T[0])

      # Corrected FDM formulation for surface node:
      T_new[0] = T[0] + 2 * alpha * dt / dx**2 * (T[1] - T[0] + q_net * dx /

      # x=L (Inner surface): Adiabatic (Simplified scenario) or heat transfer
      # Here we assume adiabatic for "worst-case" (heat accumulation)
      T_new[nx] = T[nx] + 2 * alpha * dt / dx**2 * (T[nx-1] - T[nx])

      T = T_new
      time += dt

      # Check for reaching critical temperature (Inner surface)
      if T[nx] >= T_crit:
          return time # Time to failure (seconds)
```

Fig. 2. Python algorithm for Monte Carlo simulation and solving the Heat Dissipation equation

Comparative Analysis of Static and Probabilistic Risk. It should be noted that the risk analysis was initially performed using the traditional deterministic method. In this case, the mean values of the input variables were used:

- Wind speed: vmean ≈ 7.5 m/s;
- Temperature: Tmean = 30°C.

Under the specified average conditions, the failure time tfail calculated by the deterministic model was 1470 seconds (24.5 minutes). This figure is considered the primary criterion for all evacuation plans as well as firefighting tactics.

However, the results of the hybrid model indicate that this approach does not reflect reality and fails to identify critical risks. According to the Monte Carlo simulation results, the failure time is not a fixed figure but a stochastic quantity ranging from 15 minutes to 45 minutes.

The frequency histogram of the simulation results and the Cumulative Distribution Function differ from a normal distribution. The statistical results are as follows (Table 1):

Table 1 – Comparative analysis of static (deterministic) and hybrid (probabilistic) model results

Parameter	Static Approach	Probabilistic Approach (Hybrid Model)	Difference
Input Conditions	Fixed mean values (v=7.5, T=30)	Distributions (Weibull, Gaussian)	The hybrid model accounts for natural variability.
Result (Time)	24.5 dəq	Mean: 25.1 min, Range: 15-45 min	The static model creates "false precision."
Risk Interpretation	Failure will occur after 24.5 min.	Probability of failure increases over time	The dynamic risk concept alters decision-making.
Safety Margin	Not considered	Measured via 95% CI and Tail Risk	The hybrid model identifies extreme scenarios.

- Mean time: 25.1 minutes;
- Standard deviation: 4.2 minutes;
- Median (50-th quantile): 24.8 minutes;
- 95% confidence interval: 18.5-32.3 minutes.

This implies that in 95% of cases, the object will fail due to the disaster between 18.5 and 32.3 minutes. However, it is the worst-case scenario, not the average, that demands attention.

The greatest advantage of the hybrid model emerged in the "Left tail" analysis. The left side of the distribution describes scenarios where the object fails earliest. in approximately 5% of simulations (500 scenarios), the object failed in less than 18 minutes.

Physical Interpretation. During the physical interpretation of the experiment, an interesting and seemingly contradictory fact emerged. While wind is typically perceived as a factor that exacerbates and spreads forest fires, its role in this object fire scenario was dual. Correlation analysis revealed a positive correlation between wind speed and failure time. In other words, the stronger the wind, the later the object heats up. The physical explanation for this is as follows:

$$q''_{net} = q''_{rad} + h_c(T_{env} - T_{surf}). \quad (6)$$

Conclusion. The model proposed in this research demonstrates a significant methodological innovation by successfully combining the deterministic accuracy of physical processes (Heat Conduction PDE) with the statistical comprehensiveness of stochastic methods (Monte Carlo, Weibull/Gaussian distributions). This hybrid approach has enabled the description of risk not as a single "static" value, but as a probability distribution, thereby forming a more realistic and informative landscape for decision-makers.

The conducted computational experiments have proven the limitations of the traditional deterministic approach; while the evacuation time of 24.5 minutes predicted by the static model holds true in only 50% of cases from a probability theory perspective, the new model revealed that accidents could occur in less than 18 minutes with a 5% probability ("Tail Risk"). Identifying this critical difference in time indicators is of decisive importance for saving human lives in emergency situations.

Furthermore, the research results uncovered physical paradoxes regarding the complex nature of the wind's role in Natech scenarios. It was determined that in a forest fire scenario, strong wind, contrary to expectations, increases the resilience of industrial tanks by creating a convective cooling effect, whereas calm weather conditions are considered a source of higher danger.

References

1. Carta, J. A., Ramirez, P., & Velazquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 933-955. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.005
2. Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., & Zanelli, S. (2005). The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 127(1-3), 14-30. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.07.003
3. Cozzani, V., Campedel, M., Renni, E., & Krausmann, E. (2010). Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 501-509. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.042
4. Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics* (3rd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119975465
5. MES of Republic of Azerbaijan (2023). *Statistics and Analysis of disasters*. Baku. https://fhn.gov.az/en/statistics/statistical-data
6. Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M.,... & Wieczorek, C. (Eds.). (2015). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0
7. Khan, F., Hashemi, S. J., Paltrinieri, N., Amyotte, P., Cozzani, V., & Reniers, G. (2016). Dynamic risk management: a contemporary approach to process safety management. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 14, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.07.002
8. Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E. (2017). *Natech Risk Assessment and Management: Reducing the Risk of Natural-Hazard Impact on Hazardous Installations*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803807-9.00001-3
9. Naderpour, M., Rizeei, H. M., Khakzad, N., & Pradhan, B. (2019). Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106558. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106558
10. Paltrinieri, N., & Khan, F. (2020). *Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry: Evolution and Interaction with Parallel Disciplines in the Perspective of Industrial Application*. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811965-5.00001-0
11. Pedroni, N., & Zio, E. (2017). Uncertainty quantification in risk assessment of industrial systems. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 431-443. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10216-9
12. Reniers, G., & Cozzani, V. (Eds.). (2013). *Domino Effects in the Process Industries: Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00001-1
13. Ricci, F., Scarponi, G. E., Pastor, E., Planas, E., & Cozzani, V. (2021). Safety distances for storage tanks to prevent fire damage in Wildland-Industrial Interface. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 693-702. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.022
14. Ricci, F., Casson Moreno, V., & Cozzani, V. (2023). Natech accidents triggered by heat waves. *Safety*, 9(2), 33. https://doi.org/10.3390/safety9020033
15. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D.,... & SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
16. Zio, E. (2013). *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4588-2

Received (надійшла) 25.01.2026

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Yunusov Mir Ramin Mir Gasim – the teacher at the Baku Engineering University, PhD Student at the Institute of Mathematics, Baku, Azerbaijan; e-mail: myunusov@beu.edu.az; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8323-4279

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

УДК 004.75:004.056:658.7 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.4

P. ZHERZHERUNOV, O. SHMATKO

DOCKERIZED BLOCKCHAIN ARCHITECTURE FOR SECURE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT SYSTEMS

Modern supply chain management systems increasingly rely on distributed architectures to ensure transparency, integrity, and trust between participants. Blockchain technology provides a promising foundation for such systems; however, traditional consensus mechanisms introduce high computational overhead, energy inefficiency, and privacy risks. These limitations are particularly critical for small and medium-sized enterprises (SMEs) with constrained computational resources, that they are using to expand on their traditional informational systems and not to integrate distributed technologies into the work process, as setup process for blockchain tools is more complex than centralized approach. This paper proposes a private, dockerized blockchain architecture for supply chain management that combines the Proof of Friendship (PoF) consensus mechanism with Zero-Knowledge Proofs (ZKP). By integrating a private, dockerized framework with the Proof of Friendship consensus and Zero-Knowledge Proofs, this architecture enables resource-constrained enterprises to achieve a high-performance decentralized network that simultaneously ensures sub-second transaction validation through social trust metrics, robust protection of competitive business intelligence via cryptographic privacy, and seamless cross-platform deployment through containerization, ultimately overcoming the traditional trade-offs between system transparency, operational cost, and data confidentiality in global trade. PoF extends Proof of Stake by incorporating social trust indicators, including transaction success rate and geographic diversity of validators, enabling resource-efficient and decentralized consensus. ZKP mechanisms are integrated through an off-chain prover module, allowing transaction correctness to be verified without revealing sensitive business data. The proposed approach enhances cybersecurity, data confidentiality, and system scalability while reducing computational costs. Simulation results demonstrate improved resistance to Sybil attacks, reduced validator centralization, and acceptable transaction latency for corporate blockchain deployments.

Keywords: blockchain security, supply chain management, proof of friendship, zero-knowledge proofs, privacy-preserving systems, distributed information systems.

П. Ю. ЖЕРЖЕРУНОВ, О. В. ШМАТКО

ДОКЕРИЗОВАНА АРХІТЕКТУРА БЛОКЧЕЙНУ ДЛЯ БЕЗПЕЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАЧАННЯ

Сучасні системи управління ланцюгами постачання дедалі частіше використовують розподілені архітектури для забезпечення прозорості, цілісності та довіри між учасниками. Технологія блокчейн створює перспективну основу для таких систем, однак традиційні механізми консенсусу характеризуються високими обчислювальними витратами, енергетичною неефективністю та ризиками для конфіденційності. Ці обмеження є особливо критичними для малих і середніх підприємств (МСП), які мають обмежені обчислювальні ресурси та використовують їх переважно для розширення своїх традиційних інформаційних систем, а не для інтеграції розподілених технологій у робочі процеси, оскільки налаштування інструментів блокчейну є складнішим порівняно з централізованим підходом. У роботі запропоновано приватну докеризовану архітектуру блокчейну для систем управління ланцюгами постачання, що поєднує механізм консенсусу Proof of Friendship (PoF) із використанням Zero-Knowledge Proofs (ZKP). Завдяки інтеграції приватного контейнеризованого середовища з механізмом консенсусу Proof of Friendship та криптографічними доказами з нульовим розголошенням запропонована архітектура дозволяє підприємствам з обмеженими ресурсами створювати високопродуктивну децентралізовану мережу. Така мережа забезпечує підтвердження транзакцій менш ніж за секунду на основі метрик соціальної довіри, надійний захист конфіденційної комерційної інформації за допомогою криптографічних методів, а також зручне розгортання на різних платформах завдяки контейнеризації. У результаті долаються традиційні компроміси між прозорістю системи, операційними витратами та конфіденційністю даних у глобальній торгівлі. Механізм PoF розширює підхід Proof of Stake, включаючи індикатори соціальної довіри, зокрема рівень успішності транзакцій та географічну різноманітність валідаторів, що забезпечує ресурсоефективний і децентралізований процес досягнення консенсусу. Механізми ZKP інтегруються через модуль доказу поза блокчейном (off-chain prover), що дозволяє перевіряти коректність транзакцій без розкриття конфіденційних бізнес-даних. Запропонований підхід підвищує рівень кібербезпеки, конфіденційності даних та масштабованості системи, одночасно зменшуючи обчислювальні витрати. Результати моделювання демонструють підвищену стійкість до атак типу Sybil, зменшення централізації валідаторів та прийнятну затримку транзакцій для корпоративних блокчейн-рішень.

Ключові слова: безпека блокчейну, управління ланцюгами постачання, proof of friendship, zero-knowledge proofs, системи зі збереженням конфіденційності, розподілені інформаційні системи.

Introduction. The increasing adoption of blockchain technologies in distributed management systems, including logistics platforms and Industry 4.0 environments, has intensified the fundamental tension between transparency requirements and the need to preserve the confidentiality of sensitive data. Core blockchain properties such as immutability, traceability, and public verifiability enhance trust among stakeholders, yet simultaneously complicate compliance with data protection regulations and the safeguarding of commercial secrets [1] - [6]. To address this dilemma, contemporary research increasingly promotes the concept of “privacy by design,” whereby cryptographic primitives such as zero-knowledge proofs, secure multi-party computation, and homomorphic encryption are embedded directly into consensus protocols and smart contract execution layers [1]–[3].

Related Work. Comparative studies of cryptographic privacy-preserving techniques indicate that the integration of zero-knowledge proofs, multi-party computation, and homomorphic encryption with public verification mechanisms enables a new class of verifiable privacy-preserving computing architectures [1], [3]. These approaches either relocate computation to off-chain environments with on-chain verifiability through succinct

© P. Y. Zherzherunov, O. V. Shmatko, 2026

proofs, distribute sensitive data among multiple parties to prevent unilateral disclosure, or allow computations to be performed directly over encrypted data. Empirical evaluations of lightweight homomorphic encryption schemes, such as Paillier-based constructions, demonstrate acceptable computational overhead and robustness against replay and forgery attacks, rendering them suitable for industrial and logistics scenarios characterized by high event frequency and stringent reliability requirements [2], [3].

From a systems perspective, the literature emphasizes that privacy in distributed management systems is achieved through layered architectural patterns combining identity and consent management, data channel separation, privacy-preserving computation, and regulatory compliance mechanisms [1], [5]. Self-sovereign identity models and consent-aware access control frameworks enable fine-grained governance of participant rights, while channelized ledgers and context-specific sub-registries reduce unnecessary data exposure. To ensure compatibility with regulatory regimes such as the GDPR, redactable and editable distributed ledger technologies have been proposed, notably through initiatives such as the NIST Data Block Matrix for Hyperledger Fabric, which reconcile integrity guarantees with controlled data modification or removal—an essential requirement for industrial systems with evolving access policies [6], [5].

Evidence from high-load domains, particularly healthcare and Internet of Medical Things systems, further illustrates the feasibility of scalable, privacy-preserving blockchain architectures employing hybrid cryptographic schemes, lightweight authorization proofs, and energy-efficient consensus protocols [7]. These solutions achieve substantial reductions in latency and energy consumption without compromising confidentiality, offering transferable insights for distributed management systems. Specifically, the use of multi-channel ledgers, private smart contracts, and cryptographic access proofs enables the separation of production, supply, and project management data flows while preserving auditability without exposing primary data [1]-[7].

In the context of collective decision-making and knowledge management, blockchain-supported federated learning has emerged as a viable paradigm for reconciling local data privacy with global model consistency and incentive-compatible collaboration [4]. Such architectures are applicable to management systems tasked with demand forecasting, route optimization, and real-time quality control, while consent-centric and self-sovereign identity frameworks further strengthen governance over data subject rights in multi-stakeholder environments [5], [4].

Ukrainian research in logistics and project management provides domain-specific problem formulations that align closely with privacy-oriented blockchain architectures in distributed management systems. Studies on proactive logistics project management emphasize early risk detection and transparent communication, which are compatible with immutable event logs and zero-knowledge-based auditing mechanisms that avoid disclosure of commercially sensitive information [8]. Strategic supply chain modeling under information asymmetry highlights the need for controlled data sharing, where permissioned blockchains combined with consent policies and self-sovereign identity mechanisms can reduce information leakage while maintaining access to critical performance indicators [9]. Multi-level planning of production and concrete supply chains underscores the importance of vertical and horizontal integration, for which channelized ledgers and redactable distributed ledgers enable differentiated access across operational units, contractors, and executive management without undermining audit trails [10].

Despite significant progress, several challenges remain unresolved, including the operational costs of zero-knowledge proofs, multi-party computation, and fully homomorphic encryption in high-frequency transactional environments, the reconciliation of cryptographic immutability with the right to erasure, and the long-term post-quantum resilience of distributed management infrastructures [2], [6], [7]. Current research points toward hybrid architectures that combine trusted execution environments with cryptographic proofs or integrate homomorphic encryption with granular access-controlled channels, as well as incentive mechanisms that promote correct behavior of agents in project-oriented and logistics networks [1], [4].

This paper aims to develop and evaluate a private, dockerized blockchain architecture for supply chain management that integrates the Proof of Friendship consensus mechanism with zero-knowledge proofs in order to enhance cybersecurity, data confidentiality, and consensus efficiency while addressing the requirements of small and medium-sized enterprises.

Proposed model. The proposed model builds upon recent advances in distributed management systems and supply chain platforms, where blockchain technologies are increasingly adopted to ensure data integrity, transparency, and confidentiality. Prior studies emphasize the importance of integrating blockchain into supply chain management systems in order to enhance trust among participants and mitigate the risks of unauthorized data access [11] - [15]. At the architectural level, modularity and scalability are identified as key requirements that enable adaptation to diverse business scenarios and operational constraints, particularly in multi-stakeholder environments [11].

In the proposed model, these principles are realized through a private, dockerized blockchain architecture designed for supply chain management systems. The model adopts a modular structure in which blockchain functionality is decoupled from application logic, enabling flexible deployment and independent scaling of system components. This approach is consistent with existing research on secure data transmission systems, where consensus mechanisms play a central role in maintaining consistency and reliability of shared information across distributed participants [12]. Unlike traditional

architectures, the proposed model explicitly targets the requirements of small and medium-sized enterprises by minimizing infrastructure complexity and computational overhead.

A key element of the proposed model is the use of a containerized blockchain mediator, which acts as an intermediary between client applications and the underlying blockchain network. Prior work on dockerized blockchain mediators demonstrates that containerization significantly improves deployment speed, configurability, and maintainability of blockchain-based systems [13]. In the proposed architecture, containerization enables logical isolation of functional components and supports rapid integration into existing enterprise infrastructures, thereby reducing operational costs and lowering entry barriers for SMEs [15].

The model further incorporates blockchain-based mechanisms for ensuring traceability and integrity of supply chain processes, which are critical in geographically distributed and globally interconnected logistics networks [14]. By recording verification results and cryptographic commitments rather than raw transactional data, the architecture supports auditability while preserving confidentiality. This design choice aligns with the broader trend identified in the literature toward combining blockchain technologies with modern containerization and orchestration approaches to achieve scalable, flexible, and privacy-aware distributed management systems [1] - [5].

Overall, the proposed model synthesizes architectural concepts from prior studies into a unified dockerized blockchain framework that addresses security, scalability, and confidentiality requirements of contemporary supply chain management systems. By leveraging modular design principles, containerized deployment, and blockchain-based trust mechanisms, the model provides a practical foundation for secure and efficient integration of blockchain technologies in SME-oriented distributed management environments.

Mathematical Model and Proof of Friendship Consensus Mechanism. The distributed blockchain-based supply chain management system is modeled as a set of network nodes:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (1)$$

where each node v_i represents a potential validator capable of participating in transaction validation and block formation.

Interactions among validators are governed by trust relationships established through prior cooperation history, operational stability, and organizational links between supply chain participants. These relationships are represented by a trust graph:

$$G = (V, E), E \subseteq V \times V \quad (2)$$

where E denotes the set of verified trust connections between validators.

For each validator, a set of quantitative trust-related attributes is defined, forming a trust attribute vector:

$$A_i = (S_i, G_i, E_i), S_i \in [0,1] \quad (3)$$

This vector characterizes the reliability and contribution of the validator to the network. The transaction success coefficient $S_i$is defined as the ratio between the number of correctly validated transactions and the total number of validation attempts:

$$S_i = \frac{T_i^{valid}}{T_i^{total}} \quad (4)$$

where T_i^{valid} denotes the number of correctly validated transactions;

T_i^{total} is the total number of validation attempts performed by validator v_i during the considered simulation interval.

The geographic diversification coefficient G_i reflects the spatial distribution of validators and is introduced to mitigate regional concentration of validation power. In the experimental evaluation, G_i was modeled as a normalized coefficient derived from the validator's region membership, with values assigned in the range $[0, 1]$. Specifically, validators belonging to underrepresented regions were assigned higher G_i values, while validators from regions with higher representation were assigned lower G_i values. This formulation ensures that geographic diversity influences committee composition while preserving the simplicity of the SME-oriented simulation setup.

An optional energy efficiency coefficient $E_i \in [0,1]$ may be used to represent the utilization of renewable energy sources. However, for corporate and private dockerized deployments this component is typically difficult to measure reliably and does not directly affect the core security properties of a permissioned SME-oriented blockchain network. Therefore, in the experimental evaluation presented in this paper, a simplified Trust Factor model was applied in which E_i was omitted.

To quantitatively assess validator reliability, an integrated trust metric referred to as the Trust Factor is introduced in the general form:

$$\mathrm{TF_i} = \alpha \mathrm{S_i} + \beta \mathrm{G_i} + \gamma \mathrm{E_i}, \qquad \alpha, \beta, \gamma \geq 0 \quad (5)$$

where the weighting coefficients satisfy the constraint:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (6)$$

In the conducted experiments, the Trust Factor was computed using only the transaction success coefficient and the geographic diversification coefficient:

$$TF_i = \alpha S_i + \beta G_i, \alpha + \beta = 1 \quad (7)$$

The weighting coefficients were set to $\alpha = 0.7$and $\beta = 0.3$. This choice is justified by the fact that transaction correctness and validation reliability are primary security-critical factors in corporate blockchain deployments, while geographic diversification serves as an additional decentralization constraint aimed at reducing regional concentration and coordinated attack risks. The analysis of alternative weight configurations and sensitivity to parameter changes is considered a direction for future work.

The set of validators eligible for participation in a given consensus round is defined as:

$$V_\theta = \{v_i \in V \mid TF_i \geq \theta\} \quad (8)$$

From this set, a validator committee is formed to jointly validate a block. The probability of selecting a validator is proportional to its Trust Factor:

$$p_i = \frac{TF_i}{\sum_{v_j \in V_\theta} TF_j} \quad (9)$$

Committee formation follows a stochastic selection process without replacement, which reduces the risks of validator dominance and long-term centralization.

To further prevent regional monopolization, geographic diversification constraints are imposed. Each validator $v_i$is associated with a geographic region:

$$r(v_i) \in R \quad (10)$$

Let m denote the maximum allowed number of validators from the same region in a committee. Additionally, the number of distinct regions represented in the committee is defined as:

$$\rho(C_k) = \mid \{r(v_i) \mid v_i \in C_k\} \mid \quad (11)$$

and must satisfy the constraint:

$$\rho(C_k) \geq q \quad (13)$$

where q denotes the minimum required regional diversity.

The Proof of Friendship committee selection process can therefore be expressed as the following constrained optimization problem:

$$C_k = arg \max_{\substack{C \subseteq V_\theta \\ |C|=k}} \sum_{v_i \in C} TF_i \quad (14)$$

subject to the geographic concentration and diversity constraints defined above.

The proposed mathematical model formalizes Proof of Friendship as a multi-criteria, trust-aware, and geographically diversified consensus mechanism. By combining an integrated Trust Factor with committee-based validation and spatial constraints, the model improves resistance to Sybil and Eclipse attacks, reduces centralization risks, and ensures practical applicability for corporate blockchain-based supply chain management systems.

Results and Discussion. The experimental study aims to evaluate the effectiveness of the proposed Proof of Friendship (PoF) consensus mechanism with committee-based validation and geographic diversification of validators in the context of supply chain management systems. The experiments are designed to test three key hypotheses: (i) the use of the integrated Trust Factor reduces the risk of validator centralization; (ii) committee selection with geographic constraints increases resistance to coordinated attacks; (iii) stochastic validator selection does not cause a significant degradation in system performance.

A private blockchain network consisting of $n = 10$ validators was simulated, where each validator represents a typical small or medium enterprise node. All nodes were configured with a 3 GHz CPU, 16 GB RAM, and a 50 Mbps network connection. The committee size was fixed at $k = 5$. Geographic diversification constraints were defined as a maximum of $m = 2$ validators per region and a minimum of $q = 3$ distinct regions per committee (Table 1). The Trust Factor weights were set to $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.4$, and $\gamma = 0$, in accordance with the proposed mathematical model. The optional energy efficiency coefficient E_i was excluded from the experimental evaluation, since it is not reliably measurable in private dockerized deployments and does not directly affect the considered security and decentralization properties in a permissioned network

Table 1 – Experimental Setup Parameters

Parameter	Value
Number of validators n	10
Committee size k	5
Max. validators per region m	2
Min. regions per committee q	3
CPU per node	3 GHz
RAM per node	16 GB
Network bandwidth	50 Mbps
Trust Factor model	$TF_i = \alpha S_i + \beta G_i$, E_i omitted

At the initial stage, Trust Factor values were computed for all validators based on their transaction success rate $S_i$and geographic diversification coefficient G_i. The results (Table 2) demonstrate a clear differentiation among validators, enabling effective ranking and selective participation in consensus. Validators with consistently high S_i values maintained priority positions during committee selection, while nodes with marginal Trust Factor values exhibited limited participation.

These results confirm that the Trust Factor model adaptively reflects validator behavior and supports dynamic prioritization based on reliability.

Table 2 – Trust Attributes (S_i, G_i) and Trust Factor Values (TF) in the Simulated PoF Network

Validator	Region	Si	Gi	TFi
V1	R1	0.95	1.0	0.97
V2	R1	0.92	0.8	0.88
V3	R2	0.98	1.0	0.99
V4	R2	0.90	0.8	0.86
V5	R3	0.96	1.0	0.98
V6	R3	0.89	0.8	0.85
V7	R4	0.94	1.0	0.96
V8	R4	0.88	0.8	0.85
V9	R5	0.91	1.0	0.95
V10	R5	0.87	0.8	0.83

The experimental results (Table 3) show that stochastic committee selection without replacement, combined with geographic constraints, consistently produces committees of size $k = 5$that satisfy all diversification requirements. In all experimental rounds, the constraints $\mid C_k \cap r \mid \leq m$and $\rho(C_k) \geq q$were met.

Table 3 – Example Committee Composition Across Consensus Rounds

Round	Selected Validators	Regions Represented
1	V1, V3, V5, V7, V9	R1, R2, R3, R4, R5
2	V1, V3, V5, V7, V2	R1, R2, R3, R4
3	V3, V5, V7, V9, V4	R2, R3, R4, R5
4	V1, V5, V7, V9, V6	R1, R3, R4, R5
Round	Selected Validators	Regions Represented
1	V1, V3, V5, V7, V9	R1, R2, R3, R4, R5
2	V1, V3, V5, V7, V2	R1, R2, R3, R4

No committee exhibited regional concentration, and each consensus round involved validators from at least three distinct regions, confirming the effectiveness of the proposed geographic diversification constraints.

A comparative analysis of scenarios with and without geographic constraints shows that removing diversification requirements significantly increases the probability of committee dominance by validators from a single region (Table 4). In contrast, the PoF-based model effectively prevents such concentration. Moreover, the combination of Trust Factor thresholds and geographic limits complicates Sybil attacks, as the creation of multiple fictitious nodes does not automatically increase trust metrics.

Table 4 – Example Committee Composition Across Consensus Rounds

Scenario	Max. validators from one region	Centralization risk
PoF with geo-constraints	≤ 2	Low
PoF without geo-constraints	4–5	Medium
Random selection	5	High

Performance measurements (Table 5) indicate that committee-based validation does not lead to significant increases in transaction confirmation latency compared to full-validator participation. Limiting the number of active validators reduces synchronization overhead and message exchange costs. The stochastic selection mechanism introduces negligible computational overhead and is therefore suitable for SME-oriented deployments.

Table 5 – Performance Comparison

Validation mode	Avg. latency (ms)	Message overhead	CPU load
Full participation	1850	High	High
PoF committee-based	1420	Medium	Medium
Random committee	1380	Medium	Medium

The experimental results confirm that the proposed Proof of Friendship mechanism achieves an effective balance between security, decentralization, and performance in blockchain-based supply chain management systems. The integrated Trust Factor enables dynamic selection of reliable validators, while committee-based validation with geographic diversification reduces centralization risks and improves resistance to coordinated attacks. At the same time, performance remains stable and computational overhead is kept at a level acceptable for small and medium-sized enterprises. These findings support the practical applicability of Proof of Friendship in corporate and inter-organizational blockchain solutions.

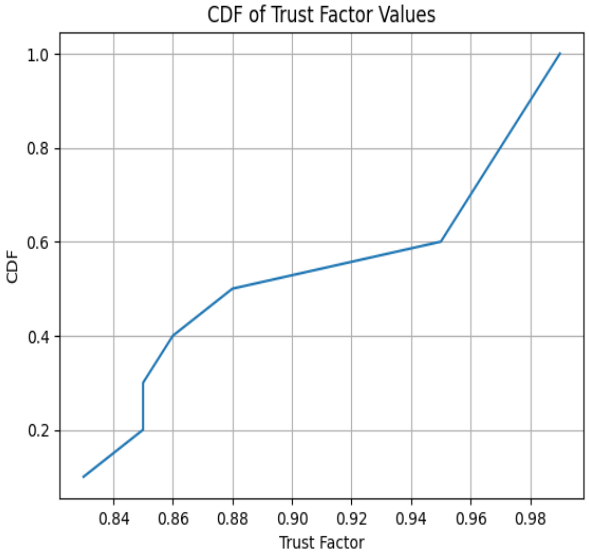

Fig. 1. Cumulative distribution function (CDF) of Trust Factor values for validators in the simulated Proof of Friendship network

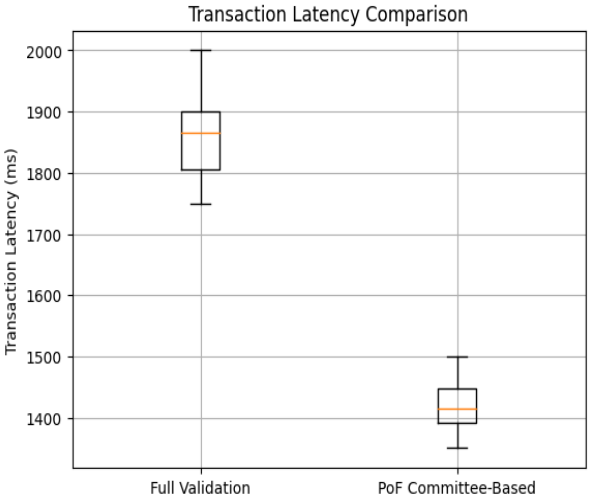

Fig. 2. Boxplot comparison of transaction latency for full validation and Proof of Friendship committee-based validation

The CDF of Trust Factor (Fig.1) values demonstrates a pronounced concentration of validators with high trust levels, indicating effective differentiation and prioritization within the proposed model. Furthermore, the latency boxplot (Fig.2) shows that committee-based validation under Proof of Friendship achieves lower median latency and reduced variability compared to full-validator participation, confirming that stochastic committee selection does not introduce significant performance degradation.

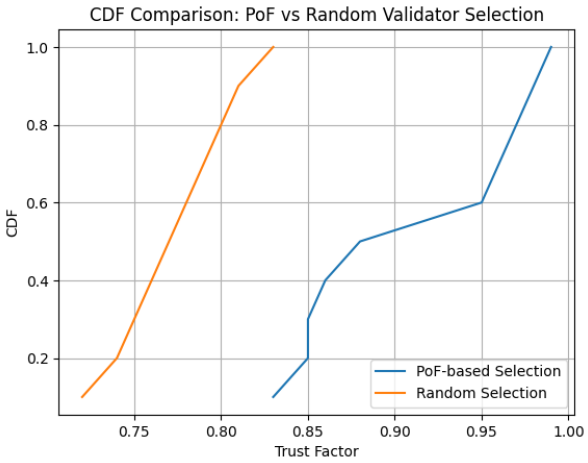

Fig. 3. Cumulative distribution function (CDF) comparison of Trust Factor values for Proof of Friendship–based and random validator selection

The CDF comparison between Proof of Friendship–based and random validator selection (Fig.3) highlights a pronounced shift toward higher Trust Factor values under PoF. While random selection results in a relatively uniform distribution concentrated at lower trust levels, PoF consistently prioritizes validators with higher reliability scores. This behavior confirms the effectiveness of the proposed trust-aware selection mechanism in reducing the participation of low-trust nodes and strengthening resistance to centralization and Sybil-style attacks.

Conclusion. This paper presented a privacy-preserving and resource-efficient blockchain architecture for supply chain management systems based on the integration of the Proof of Friendship consensus mechanism and zero-knowledge proof techniques. By extending traditional Proof of Stake with socially oriented trust metrics and geographic diversification constraints, the proposed approach addresses key limitations of existing blockchain solutions, including validator centralization, susceptibility to coordinated attacks, and excessive computational overhead.

A formal mathematical model was introduced to describe trust-aware validator selection as a constrained optimization problem, enabling transparent and reproducible committee formation. Experimental evaluation using simulation data demonstrated that the proposed mechanism effectively prioritizes high-trust validators, enforces geographic diversity, and significantly reduces centralization risks compared to random or unconstrained selection strategies. At the same time, committee-based validation under Proof of Friendship maintains stable transaction throughput and lower latency, confirming that stochastic trust-based selection does not degrade system performance.

The results indicate that the proposed dockerized blockchain architecture is well suited for small and medium-sized enterprises, offering a practical balance between security, decentralization, and efficiency. Future work will focus on large-scale deployment studies, formal security proofs against advanced adversarial models, and the integration of post-quantum cryptographic mechanisms to further enhance the long-term resilience of blockchain-based supply chain management system.

Список літератури

1. Valadares D. C. G., Perkusich A., Martins A. F., Alshawki M. B., Seline C. Privacy Preserving Blockchain Technologies. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 16. 7172. doi: 10.3390/s23167172
2. Wang G., Li C., Dai B., Zhang S. Privacy Protection Method for Blockchain Transactions Based on Lightweight Homomorphic Encryption. *Information.* 2024. Vol. 15, no. 8. 438. doi: 10.3390/info15080438
3. Bontekoe T. H., Karastoyanova D., Turkmen F. Verifiable Privacy Preserving Computing. *arXiv.* 2023. URL: https://arxiv.org/pdf/2309.08248
4. Liu J., Chen C., Li Y., Sun L., Song Y., Zhou J., Jing B., Dou D. Enhancing trust and privacy in distributed networks: A comprehensive survey on blockchain based federated learning. *Knowledge and Information Systems.* 2024. Vol. 66. P. 4377–4403. doi: 10.1007/s10115-024-02117-3
5. Garcia R. D., Ramachandran G., Dunnett K., Jurdak R., Ranieri C. M., Krishnamachari B., Ueyama J. A Survey of Blockchain Based Privacy Applications: An Analysis of Consent Management and Self Sovereign Identity Approaches. *arXiv.* 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2411.16404
6. Roberts J. D., DeFranco J. F., Kuhn D. R. Data Block Matrix and Hyperledger Implementation: Extending Distributed Ledger Technology for Privacy Requirements. *NIST preprint.* 2023. URL: https://csrc.nist.gov/projects/redactable-distributed-ledger
7. Hao L., Wang R., Wang X., Yue X., Tariq N., Sajid A. Post-quantum inspired scalable blockchain architecture for internet hospital systems with lightweight privacy preserving access control. *PLOS ONE.* 2025. Vol. 20, no. 12. e0332887. doi: 10.1371/journal.pone.0332887
8. Шадура Д., Меленчук В. Проактивне управління проєктами логістичних підприємств. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Стратегічне управління, портфель, програма та проєктний менеджмент.* 2023. № 1 (7). С. 93–99. doi: 10.20998/2413-3000.2023.7.12
9. Семенчук К. Моделювання стратегій ланцюгів постачань у проєктній діяльності. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Стратегічне управління, портфель, програма та проєктний менеджмент.* 2024. № 1 (8). С. 58–65. doi: 10.20998/2413-3000.2024.8.8
10. Бугаєвський М., Петренко Я. Багаторівневе планування й управління у розвитку виробництва та ланцюжках поставок бетону. *Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Стратегічне управління, портфель, програма та проєктний менеджмент.* 2025. № 1 (10). С. 10–17. doi: 10.20998/2413-3000.2025.10.2
11. Zherzherunov P., Shmatko O. Architectural approach to data protection in distributed supply chain management system using blockchain nodes. *Bulletin of National Technical University «KhPI». Ser.: System Analysis, Control and Information Technologies.* 2025. № 2 (14). P. 26–33.
12. Zherzherunov P., Shmatko O. Application of the consensus mechanism for developing a secure data transmission system. *Collection of Scientific Papers «ЛОГОС»*. Paris, France, 2025. P. 109–113. doi: 10.36074/logos-31.10.2025.019
13. Zherzherunov P., Shmatko O. Designing the architecture and software components of the dockerised blockchain mediator. *Bulletin of National Technical University «KhPI». Ser.: System Analysis, Control and Information Technologies.* 2025. № 1 (13). P. 101–105.
14. Zherzherunov P., Shmatko O. Advancing supply chain integrity and traceability through blockchain integration. *Collection of Scientific Papers «ЛОГОС».* Cambridge, UK, 2025. P. 306–310. doi: 10.36074/logos-09.05.2025.063
15. Zherzherunov P., Shmatko O. Enhancing supply chain integrity in SMEs through dockerized blockchain architecture. *Матеріали конференцій МЦНД.* Черкаси, Україна, 2025. С. 171–174. doi: 10.62731/mcnd-11.04.2025.006

References (transliterated)

1. Valadares D. C. G., Perkusich A., Martins A. F., Alshawki M. B., Seline C. Privacy Preserving Blockchain Technologies. *Sensors***.** 2023, vol. 23, no. 16, article 7172. doi: 10.3390/s23167172
2. Wang G., Li C., Dai B., Zhang S. Privacy Protection Method for Blockchain Transactions Based on Lightweight Homomorphic Encryption. *Information***.** 2024, vol. 15, no. 8, article 438. doi: 10.3390/info15080438
3. Bontekoe T. H., Karastoyanova D., Turkmen F. Verifiable Privacy Preserving Computing. *arXiv***.** 2023. Available at: https://arxiv.org/pdf/2309.08248 (accessed 03.05.2026).
4. Liu J., Chen C., Li Y., Sun L., Song Y., Zhou J., Jing B., Dou D. Enhancing trust and privacy in distributed networks: A comprehensive survey on blockchain based federated learning. *Knowledge and Information Systems***.** 2024, vol. 66, pp. 4377–4403. doi: 10.1007/s10115-024-02117-3
5. Garcia R. D., Ramachandran G., Dunnett K., Jurdak R., Ranieri C. M., Krishnamachari B., Ueyama J. A Survey of Blockchain Based Privacy Applications: An Analysis of Consent Management and Self Sovereign Identity Approaches. *arXiv***.** 2024. Available at: https://arxiv.org/abs/2411.16404 (accessed 03.05.2026).
6. Roberts J. D., DeFranco J. F., Kuhn D. R. Data Block Matrix and Hyperledger Implementation: Extending Distributed Ledger Technology for Privacy Requirements. *NIST preprint***.** 2023. Available at: https://csrc.nist.gov/projects/redactable-distributed-ledger (accessed 03.05.2026).
7. Hao L., Wang R., Wang X., Yue X., Tariq N., Sajid A. Post-quantum inspired scalable blockchain architecture for internet hospital systems with lightweight privacy preserving access control. *PLOS ONE***.** 2025, vol. 20, no. 12, article e0332887. doi: 10.1371/journal.pone.0332887
8. Shadura D., Melenchuk V. Proaktyvne upravlinnya proyektamy lohistychnykh pidpryyemstv [Proactive project management of logistics enterprises]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, portfel', prohrama ta proektnyy menedzhment* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2023, no. 1 (7), pp. 93–99. doi: 10.20998/2413-3000.2023.7.12
9. Semenchuk K. Modelyuvannya stratehiy lantsyuhiv postachan' u proyektniy diyal'nosti [Modeling supply chain strategies in project activity]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, portfel', prohrama ta proektnyy menedzhment* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2024, no. 1 (8), pp. 58–65. doi: 10.20998/2413-3000.2024.8.8
10. Buhayevs'kyy M., Petrenko Ya. Bahatorivne planuvannya y upravlinnya u rozvytku vyrobnytstva ta lantsyuzhkakh postavok betonu [Multilevel planning and management in the development of production and concrete supply chains]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, portfel', prohrama ta proektnyy menedzhment* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2025, no. 1 (10), pp. 10–17. doi: 10.20998/2413-3000.2025.10.2
11. Zherzherunov P., Shmatko O. Architectural approach to data protection in distributed supply chain management system using blockchain nodes. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. 2025, no. 2 (14), pp. 26–33.
12,. Zherzherunov P., Shmatko O. Application of the consensus mechanism for developing a secure data transmission system. *Collection of Scientific Papers "ΛΟΓΟΣ"*. Paris, France, 2025, pp. 109–113. doi: 10.36074/logos-31.10.2025.019
13. Zherzherunov P., Shmatko O. Designing the architecture and software components of the dockerised blockchain mediator. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. 2025, no. 1 (13), pp. 101–105.
14. Zherzherunov P., Shmatko O. Advancing supply chain integrity and traceability through blockchain integration. *Collection of Scientific Papers "ΛΟΓΟΣ"*. Cambridge, UK, 2025, pp. 306–310. doi: 10.36074/logos-09.05.2025.063
15. Zherzherunov P., Shmatko O. Enhancing supply chain integrity in SMEs through dockerized blockchain architecture. *Materialy konferentsiy MTsND* [Proceedings of MCND Conferences]. Cherkasy, Ukraine, 2025, pp. 171–174. doi: 10.62731/mcnd-11.04.2025.006

Надійшла (received) 05.02.2026

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жержерунов Павло Юрійович (Zherzherunov Pavlo Yuriyovych) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: Pavlo.Zherzherunov@cs.khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7240-9395

Шматко Олександр Віталійович (Shmatko Oleksandr Vitaliyovych) – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: oleksandr.shmatko@khpi.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2426-900X.

UDC 004.8:159.955:005.32 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.5

V. ZIUZIUN

FORMATION THE BASIC CONCEPT OF A METHOD FOR MANAGING THE RISK OF TIME LOSSES IN IT PROJECTS BASED ON MODELING THE TEAM'S COGNITIVE PROFILE

This scholarly work addresses the pressing problem of managing the risks of time losses in IT projects that arise from cognitive interruptions experienced by specialists while performing complex tasks. The author notes that contemporary Agile methodologies create an inherent conflict between the need for deep concentration (the «flow state») and the intensity of team communications. This conflict leads to the accumulation of cognitive debt – a latent risk reflecting a reduced ability of the team to return to productive work after interruptions. The purpose of the study is to develop a method that treats the team's cognitive profile as a dynamic project resource for the quantitative forecasting of deadline-failure risks. The scientific novelty of the work lies in the introduction of formalized metrics for cognitive debt and interruption cost, which make it possible to assess the systemic consequences of cognitive losses along the critical path of the project dependency graph. The proposed method is based on modeling an individual specialist's cognitive viscosity and calculating the reconcentration time required to restore the task's mental models. The mathematical core of the method transforms a planned work schedule into a probabilistic model in which each interruption acts as a factor that extends lead time. A key element is the determination of interruption cost, which accounts not only for the personal losses of an individual developer but also for the cascading idle time of all dependent team members. The practical significance of the study lies in the possibility of integrating these models into IT project management systems for adaptive regulation of communications. Based on probabilistic risk assessment, the system can propose preventive measures such as a «cognitive quarantine» (blocking non-priority notifications) or dynamic sprint or Agile process rescheduling. In summary, the method enables a shift from reactive acknowledgment of delays to proactive management of cognitive resources. This provides a scientific foundation for protecting developers' workspaces, minimizing cascading risks, and increasing the overall predictability of delivery timelines in cognitively intensive projects.

Keywords: intelligent filtering, cognitive viscosity, flow state, Agile team, mathematical modeling, team effectiveness, autonomy buffer, dependency graph, Agile process progress, communication in IT.

В. І. ЗЮЗЮН

ФОРМУВАННЯ БАЗОВОГО КОНЦЕПТУ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ЧАСОВИХ ВТРАТ В ІТ-ПРОЄКТАХ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ КОГНІТИВНОГО ПРОФІЛЮ КОМАНДИ

Наукова праця присвячена вирішенню актуальної проблеми управління ризиками часових втрат в ІТ-проєктах, що виникають через когнітивні переривання фахівців під час виконання складних завдань. Автор зазначає, що сучасні Agile-методології створюють конфлікт між потребою в глибокій концентрації («стані потоку») та інтенсивністю командних комунікацій. Це призводить до накопичення «когнітивного боргу» – прихованого ризику, що відображає зниження здатності команди повертатися до продуктивної роботи після відволікань. Метою дослідження є розробка методу, який розглядає когнітивний профіль команди як динамічний ресурс проєкту для кількісного прогнозування ризиків зриву дедлайнів. Наукова новизна полягає у впровадженні формалізованих метрик когнітивного боргу та вартості переривання, що дозволяють оцінити системні наслідки когнітивних втрат на критичному шляху графа проєктних залежностей. Запропонований метод базується на моделюванні індивідуальної «когнітивної в'язкості» фахівця та розрахунку часу реконцентрації, необхідного для відновлення ментальних моделей задачі. Математичне ядро методу трансформує плановий графік робіт у ймовірнісну модель, де кожне переривання виступає фактором подовження Lead Time. Ключовим елементом є визначення вартості переривання, яка враховує не лише особисті втрати розробника, а й каскадні простої всіх залежних учасників команди. Практичне значення роботи полягає у можливості інтеграції цих моделей у системи управління ІТ-проєктами для адаптивного регулювання комунікацій. На основі ймовірнісної оцінки ризику система може пропонувати превентивні заходи, такі як «когнітивний карантин» (блокування непріоритетних сповіщень) або динамічне перепланування спринту (Agile-процесу). Узагальнюючи, метод дозволяє перейти від реактивного констатування затримок до проактивного управління когнітивним ресурсом. Це забезпечує наукове підґрунтя для захисту робочого простору розробників, мінімізації каскадних ризиків та підвищення загальної передбачуваності термінів реалізації інтелектуально містких проєктів.

Ключові слова: інтелектуальна фільтрація, когнітивна в'язкість, стан потоку, Agile-команда, математичне моделювання, командна ефективність, запас автономності, граф залежностей, прогрес Agile-процесів, комунікація в ІТ.

Introduction and problem statement. In modern software engineering, the efficiency of developing complex systems largely depends on specialists' ability to sustain prolonged, uninterrupted cognitive concentration, corresponding to a state of deep intellectual immersion, or the «flow state». At the same time, Agile methodologies presuppose a high intensity of communication, which creates a fundamental contradiction between individual focus and the demands of team synchronization.

The problem is exacerbated by the fact that software development is a process of constructing complex mental models; their disruption by unregulated notifications leads to the emergence of cognitive viscosity – a condition in which the time required to restore task context becomes critically large. Existing communication management mechanisms are predominantly based on static rules and do not account for the dynamics of an individual specialist's cognitive state or the phase of the sprint (Agile process). As a result, decisions to interrupt work are made without considering their actual cost to the project as a whole.

Consequently, a cumulative effect of cognitive debt arises, reflecting a latent risk of time losses and leading to a degradation of the team's ability to rapidly return to productive work. Since traditional monitoring tools typically register only the fact of missed deadlines, it becomes evident that there is a need to formalize a quantitative relationship between an individual

© V. Ziuziun, 2026

developer's cognitive losses and team-level performance metrics. This, in turn, necessitates the development of adaptive methods capable of identifying cascading idle times and forecasting risks along the critical path of the project dependency graph before deadlines are actually violated.

Analysis of prior research and publications. An analysis of the scholarly literature in the field of managing cognitive concentration and communications in IT teams indicates a strong research interest in finding a balance between an individual developer's productivity and the overall dynamics of a project. A significant contribution to understanding the nature of interruptions was made by C. Parnin and S. Rugaber, whose works focus on programmers' need for contextual information after memory disruptions and on the design of interactive environments that support sustained concentration [1; 2]. Their studies demonstrate that frequent interruptions not only consume clock time but also deplete a developer's short-term memory, thereby extending the «warm-up» period required before productive work can resume.

Experimental results show that each unregulated interruption causes substantial time losses, averaging 10–15 minutes needed to reconstruct the task's mental models and re-enter the flow state.

In parallel with cognitive research, an active line of work has emerged on the development of intelligent notification-filtering systems. Contemporary approaches rely on machine learning methods to analyze user preferences, as exemplified by the PrefMiner system and other models of adaptive information flow management [3; 4; 5]. In this context, particular attention should be given to study [6], which introduces and investigates the concept of cognitive viscosity for optimizing the management of Agile teams.

The mathematical foundation for modeling structural interrelationships in such systems traditionally relies on graph theory [7; 8], while the analysis of the intensity of incoming information flows is carried out using the apparatus of queueing theory [9]. To address complex optimization problems, researchers often employ multicriteria methods and stochastic algorithms [10; 11; 12]. In particular, recent work in the field of Agile management has focused on the application of artificial intelligence to forecasting team productivity and managing large groups of developers [13; 14].

Despite the substantial body of publications, most existing approaches remain limited in scope, as they treat the specialist as an isolated unit. The cascading impact of individual cognitive losses on the critical path of the entire project and on the risks of deadline failure is often overlooked. The absence of a formalized link between the team's dynamic cognitive debt and IT project performance metrics underscores the need to develop new integrated methods for managing the risks of time losses.

The purpose of this work is to develop a method for managing the risks of time losses in IT projects based on modeling the team's cognitive profile as a dynamic resource. The method provides quantitative identification, assessment, and forecasting of deadline-failure risks by integrating specialists' cognitive characteristics, cognitive debt metrics, and interruption cost with a model of project dependencies and the critical path.

Main part of the study. The proposed method for managing the risks of time losses is based on a systems approach that views the development process as a dynamic interaction between individual cognitive resources and the project's structural dependencies. The core idea is to move from reactive management, which merely records delays after they occur, to a proactive intelligent monitoring system that relies on leading indicators of team state.

The method's concept encompasses an end-to-end process that begins with formalizing the human factor through cognitive profiles and culminates in automated, adaptive decision-making aimed at stabilizing the work schedule. Within this framework, each disruptive influence – such as unplanned communication or meetings – is interpreted as an event that generates an increase in cognitive debt and triggers a cascading interruption cost at the team level.

The mathematical core of the method enables the transformation of developers' subjective experiences into quantitative metrics, which are then integrated with the project task graph to compute a probabilistic deadline model. In this way, the method makes it possible to create a unified information space in which the project's technological constraints are synchronized with the cognitive capacities of specialists, allowing the manager to operate with precise data on the current sprint's resilience margin (Agile process).

Block A. Forming the team's cognitive profile as an input parameter of the risk management method. The formation of the team's cognitive profile is a foundational stage of the proposed method, as it enables the translation of the abstract notion of the "human factor" into the domain of measurable project indicators. Within this study, the cognitive profile is treated as a dynamic resource that reflects the collective's ability to perform cognitively intensive tasks without a degradation of overall productivity under the influence of external stimuli.

Cognitive debt is a formalized indicator of accumulated risk of time losses that increases as a result of a series of unregulated interruptions and fragmentation of the work process, leading to a degradation of a specialist's ability to quickly return to a state of deep concentration (the «flow state»).

The introduction of this term makes it possible to systematically assess the «cost» of each message or meeting through the lens of time losses along the critical path. When a specialist is exposed to an excessive number of external requests, their cognitive debt grows, giving rise to the phenomenon of cognitive viscosity [6] – a condition in which the time required to restore task context becomes critically large, thereby creating prerequisites for deadline violations.

To ensure that the cognitive profile becomes an effective risk management instrument, the method provides its enrichment along several key dimensions:

- *Aggregation of individual characteristics and roles.* The approach accounts not only for specialists' psychophysiological parameters, such as reconcentration speed, but also for the specifics of their roles within the project structure.

- *Monitoring of dynamic state.* The profile is continuously updated based on metrics of uninterrupted work and interruption frequency, enabling the real-time identification of zones where focus declines to critical levels.

- *Synchronization with structural dependencies.* Cognitive indicators are mapped onto the project task graph, making it possible to identify nodes at which the individual losses of a single developer may trigger cascading delays across the entire sprint (Agile process).

Thus, the cognitive profile functions not merely as a descriptive characteristic but as a controllable variable that provides a scientific basis for forecasting time losses. The availability of such a detailed profile enables a shift from general monitoring of team condition to the direct identification of specific risks, implemented through the calculation of quantitative metrics for the cost of each individual interruption.

Block B. Identifying cognitive risks through cognitive debt and interruption cost metrics. At the next stage of the method's implementation, the focus shifts from a descriptive cognitive profile to the direct identification of time-loss risks. A major challenge in Agile projects is that cognitive losses are typically «invisible» until a deadline is actually missed.

To address this issue, the method introduces a system of quantitative assessment based on two key metrics: *cognitive debt and interruption cost.* These indicators make it possible to transform subjective factors of intellectual fatigue and loss of focus into formalized data suitable for algorithmic analysis and optimization.

A central role in risk identification is played by the dynamics of cognitive debt, which within the method is interpreted as an accumulated risk of time losses. It reflects the systemic effect of workday fragmentation: each new interruption not only consumes time but also increases a specialist's level of cognitive viscosity, making every subsequent return to work more difficult. At the same time, the method accounts for the cognitive resource's capacity for self-recovery during periods of uninterrupted concentration, enabling the manager to observe the team's actual productivity «balance» at any point in the sprint (Agile process).

In parallel with the cumulative effect of cognitive debt, the method employs the interruption cost metric, which serves as a tool for assessing the immediate impact of managerial decisions on productivity:

- *Quantitative impact assessment.* The interruption cost allows determining how much total time the team would lose if a specific specialist at a critical project node were distracted by a non-priority message.

- *Forecasting systemic consequences.* By integrating with the project dependency graph model, this metric illustrates how even a brief interruption of a single developer can trigger cascading idle time for other team members through task structural dependencies.

- *Communication optimization.* Formalizing the interruption cost provides a basis for establishing adaptive notification-filtering rules, where the priority of incoming information is aligned with its potential harm to the specialist's current focus state.

Such a system of metrics enables a move beyond intuitive management toward the precise calculation of deadline-violation risks. Understanding the quantitative cost of each interruption and the accumulated level of cognitive debt sets the stage for the next step: mathematically modeling individual losses, which allows for a detailed reconstruction of the concentration recovery timeline for each specific developer – a process that will be examined further in the study.

Moreover, within the proposed method, risk identification is not limited to merely recording the moment of an interruption. It also encompasses analysis of the chain reaction triggered by time losses. When the risk of time loss materializes as a primary threat factor, it acts as a trigger for a series of secondary risks [15] that can destabilize the project at multiple levels (see Table 1).

The introduction *of cognitive debt and interruption* cost metrics allows these hidden threats to be detected early, at the stage of their emergence. Thus, the formalization of cognitive factors becomes a tool not only for maintaining the current development pace but also for ensuring overall stability and the quality of the intellectual product within an Agile environment.

Block C. Mathematical modeling of cognitive debt dynamics and specialist reconcentration. To translate the concept of cognitive losses into the domain of quantitative management, the method formalizes a specialist's cognitive state through a dynamic cognitive debt indicator. This approach accounts not only for the immediate time lost to task switching but also for the cumulative effect of reduced concentration capacity (*cognitive viscosity*).

1. *Formalizing the accumulation of cognitive debt.* The developer's cognitive debt (D_C) at time t is proposed to be considered as an integral quantity that grows due to a series of unregulated interruptions and work process fragmentation. The increase in debt for each interruption is defined as:

$$\Delta D_C = \sigma \cdot t_{flow} \cdot f(H), \quad (1)$$

where σ – the specialist's cognitive viscosity coefficient;

$f(H)$ – a function representing the complexity of the current intellectual task context;

t_{flow} – the duration of uninterrupted intellectual immersion (flow state) prior to the disruptive event.

Using σ as a multiplier allows modeling an individual specialist's sensitivity: the higher the cognitive

viscosity, the faster the debt accumulates with each subsequent message or meeting.

This formula enables a quantitative assessment of the «strength» of destructive impact on the workflow. It shows that the longer a specialist has been in a state of deep focus (t_{flow}), the more painful and costly an interruption becomes, as it disrupts a more complex mental construct. Applying the σ coefficient allows managers to differentiate tasks: for creative architectural decisions, this value will be significantly higher than for routine test writing, enabling a more accurate prediction of cognitive debt growth depending on the type of work.

Table 1 – Identification of secondary risks for the project in the event that time-loss risk materializes as the primary threat factor

Risk category	Risk name	Description (impact on the project)
Structural-temporal	**Risk of cascading delays**	Due to the structural interdependence of tasks in the project graph, a delay at a single critical node caused by a cognitive interruption leads to idle time for related specialists, exponentially increasing the overall lead time.
	Risk of schedule slippage	The aggregated cognitive viscosity at critical nodes in the project graph results in an irreversible shift of the final deadlines for the sprint, Agile process, or release.
Technical and qualitative	**Risk of quality degradation**	In an effort to compensate for lost time, specialists may consciously or unconsciously simplify solutions, leading to increased technical debt and a higher number of code defects.
	Risk of loss of contextual knowledge	Frequent interruptions disrupt complex mental models, forcing additional time (10–15 minutes) to be spent on restoring context and re-examining sections of code.
Team-based and managerial	**Risk of disruption in team synchro-nization**	A high level of cognitive debt drives team members to avoid communication in order to protect their focus, creating information gaps and architectural errors.
	Risk of professional burnout	Working under constant «cognitive viscosity» and a deficit of «flow state» leads to emotional exhaustion and risks the loss of key experts.
	Risk of ineffective resource planning	Relying on static management rules without accounting for the dynamic cognitive state results in a misallocation of workload at critical stages of the project.

2. *Determining re-concentration (recovery) time.* According to experimental data, each interruption causes a loss of time needed to restore mental models. Within this method, the re-concentration time (τ_{rec}) is modeled as a function of the current level of cognitive debt:

$$\tau_{rec} = t_{base} \cdot (1 + ln(1 + \sigma \cdot D_C)), \quad (2)$$

where t_{base} is the baseline time to return to a «flow state» (typically 10–15 minutes), and the logarithmic dependence reflects the nonlinear increase in difficulty when restoring complex contexts as the day becomes more fragmented.

The mathematical logic of this model is based on logarithmic productivity degradation: the first few interruptions are relatively easy to handle, but after reaching a certain threshold, the accumulated debt D_C begins to exponentially complicate the return to work. The practical application of this formula lies in identifying the «point of no return», after which it is more effective for a specialist to switch tasks or take an extended break to restore cognitive resources rather than continue the current task.

The mathematical interpretation of the «point of no return» within this model is based on analyzing the limiting behavior of τ_{rec} relative to the specialist's remaining available working time. Because the logarithmic dependence implies an accelerated increase in the complexity of mental model recovery at high values of D_C, a moment emerges at which the cumulative costs of re-concentration and the compensation of cognitive viscosity σ exceed the potential productive return from continuing work on the current intellectual task.

From a managerial perspective, the point of no return is identified under the condition that:

$$\tau_{rec} > \Delta T_{available}, \quad (3)$$

where $\Delta T_{available}$ is denotes the time interval until the next scheduled interruption or the end of the working session. Reaching this threshold signals to management that the degree of day fragmentation has led to a critical degradation of concentration, at which any attempt to re-enter the «flow state» becomes economically unjustifiable due to the high cost of interruption (CoI) and the risk of cascading idle time across the entire team. Consequently, equation 3 serves not only as a means of estimating delays but also as a trigger for activating «cognitive quarantine» measures or for initiating urgent task rescheduling.

3. *Modeling the self-recovery effect of cognitive resources.* The method also accounts for the ability of cognitive resources to self-recover during periods of sustained, uninterrupted focus. If a specialist works without external distractions, the level of D_C gradually decreases, reflecting the stabilization of the work context and a reduced likelihood of quality degradation risks.

The calculated individual metrics allow determining the «cost» of an interruption for a specific developer. However, in Agile development, such losses have a cascading effect due to the structural interdependencies of tasks. This necessitates aggregating the cost of interruptions along the critical path of the project dependency graph, where individual losses are transformed into a team-wide risk metric for missed deadlines.

Overall, it can be stated that the proposed metrics D_C and CoI (the latter being responsible for estimating the cost of interruptions, with its specific properties discussed

later in the study) enable early detection of the following derivative risks:

- *Burnout risk.* Monitored through a consistently high level of D_C that fails to recover over several days.

- *Quality degradation risk.* Correlates with increasing cognitive viscosity σ at critical nodes, when a specialist begins to «simplify» tasks to save time.

Block D. Aggregating the cost of interruptions along the critical path of the project dependency graph. After determining the individual re-concentration time τ_{rec} for each specialist, it is necessary to assess the systemic impact of these losses on the entire project. Within the proposed method, the structure of an IT project is modeled using graph theory, where tasks are represented as nodes and the logical dependencies between them as edges.

1. Integrating cognitive losses into graph parameters. The traditional task duration on the critical path (t_i) is augmented with a dynamic component representing cognitive losses. Consequently, the actual task execution time (t_{fact}) becomes a stochastic variable dependent on the number of interruptions and the accumulated cognitive debt:

$$t_{fact,i} = t_{plan,i} + \sum_{j=1}^{n} \tau_{rec,j}(D_C, \sigma), \quad (4)$$

where $t_{plan,i}$ is the planned duration of the $\mathrm{i} - th$ task without considering destructive impacts;

$\sum \tau_{rec,j}$ is the total time spent restoring focus after each interruption during the task.

This model transforms a deterministic Gantt schedule into a probabilistic model, where each interruption acts as a factor extending task duration. It allows for the calculation of a realistic lead time, taking into account not only the code volume but also the communication «noise» within the development environment. In essence, formula (3) reflects the hidden time spent «warming up» cognitive resources after each meeting or message.

2. *Determining the cost of interruption (CoI).* In this method, the cost of an interruption is not treated as a fixed value but as an increase in the overall project lead time. If an interruption occurs to a specialist working on a critical node in the graph (Critical Path), the CoI equals the sum of the re-concentration time for that specialist plus the idle time of all dependent team members:

$$CoI_{total} = \tau_{rec,i} + \sum_{k \epsilon S} \Delta t_{idle,k}, \quad (5)$$

where S is the set of successor tasks whose execution is delayed due to the cascading idle effect at the current node.

Formula (4) is crucial for identifying cascading risks: it demonstrates that the cost of interrupting a specialist on the critical path is not limited to their personal time but also includes the cumulative delay of all subsequent development stages. This provides a mathematical rationale for implementing strict «quiet» or «do not disturb» policies for key developers, as their distraction multiplies idle time across the entire team due to structural dependencies in the project graph.

3. *Cognitive viscosity as a factor in cascading delay risk.* Applying this coefficient allows the identification of the most «vulnerable» nodes in the project. High cognitive viscosity on the critical path means that even a minor interruption in terms of message volume can trigger a chain reaction of delays (Dependency risk). This creates information gaps and architectural errors, as team members begin avoiding communication to protect their own focus.

Aggregating the cost of interruptions across the project graph enables managers to obtain a real-time view of lead time. However, for strategic decision-making, it is not enough to merely report current losses; it is also necessary to forecast the likelihood of successfully completing a sprint (or Agile process). Accordingly, forecasting the risk of deadline violations should be considered based on the team's aggregated cognitive viscosity, which can serve as the foundation for a probabilistic model of deadline estimation in future research.

Block E. Forecasting deadline violation risk based on the team's aggregated cognitive viscosity. The final stage of the method involves moving from a static graph analysis to dynamic forecasting of the probability of completing the project within the established deadline (t_{dead}). Since the actual task duration ($t_{fact,i}$) is a stochastic variable dependent on communication intensity and accumulated cognitive debt, risk forecasting is performed through iterative modeling of the critical path state.

1. *Calculation of aggregated cognitive viscosity* ($\sum \sigma$). The method involves computing the cumulative impact of «viscosity» on the project's critical sections. The higher this value at nodes with strong interdependencies, the greater the likelihood of a cascading delay (Dependency Risk).

2. *Probabilistic deadline assessment.* The risk of deadline violation ($R_{violation}$) is calculated as the probability that the total duration of tasks on the critical path, accounting for projected interruptions, will exceed the planned time:

$$(t_{total} > t_{dead}) = f(\sum \tau_{rec}, \sum \sigma, D_C), \quad (6)$$

where t_{dead} is the expected lead time, taking into account the current level of the team's cognitive debt and the dynamics of its recovery.

The proposed probabilistic model enables the assessment of a sprint's (or Agile process's) «safety margin». Instead of a binary «on track / off track» evaluation, the manager receives a dynamic probability distribution curve that accounts for the team's current fatigue level (D_C) and the density of upcoming communications. This allows the automatic notification system to be fine-tuned: if the probability P exceeds a critical threshold (e.g., 30%), the system automatically recommends cognitive quarantine measures to stabilize the schedule.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

3. *Adaptive decision-making.* Based on the forecast, the decision support system can recommend the following preventive measures:

- «Cognitive quarantine». Temporarily blocking all non-priority notifications for specialists on the critical path if D_C exceeds a critical threshold.

- Dynamic rescheduling. Adjusting task priorities to reduce cognitive viscosity at nodes with the highest concentration of logical dependencies.

- Velocity adjustment. Adapting planned metrics for upcoming sprints (Agile processes) based on the actual cost of interruptions (CoI), recorded during the current period.

Thus, aggregating cognitive metrics allows the transformation of the team's subjective sense of «overload» into a concrete percentage-based risk indicator, providing a scientific basis for preventive management in Agile development.

The proposed risk management method can be characterized as a proactive intelligent management system that shifts from reactive delay correction to preventive modeling. Unlike traditional Agile monitoring tools (e.g., burn-down charts), this method works with «leading indicators» – detecting drops in concentration before they manifest as actual idle time.

The method effectively creates a digital twin of the team's cognitive activity, where each message in a messenger or unplanned meeting is assigned a «cost» in units of lead time. This enables managers not merely to demand results, but to scientifically justify the protection of developers' workspaces, minimizing cascading risks along the project's critical path.

For practical implementation of the method in an Agile process, the following step-by-step algorithm is proposed:

Step 1. Profile formation. Define baseline cognitive viscosity coefficients (σ) or each specialist according to the type of tasks they handle (architectural, research, routine).

Step 2. Monitoring incoming flows. Continuously record the frequency and duration of interruptions (communications) to calculate the current cognitive debt (D_C).

Step 3. Quantitative loss assessment. Calculate the re-concentration time (τ_{rec}) for specialists based on their current state and the complexity of the context.

Step 4. Critical path analysis. Integrate the observed delays into the project dependency graph to compute the actual cost of interruptions (CoI_{total}).

Step 5. Probabilistic forecasting. Estimate the risk of deadline violation ($R_{violation}$) through iterative modeling of the remaining work execution.

Step 6. Adaptive response. Apply automated measures such as initiating a «quiet mode», redistributing workload, or adjusting the sprint scope (Agile process).

To illustrate a potential application of the method, consider a scenario in an Agile team working on a critical security module.

Situational task. A Senior developer is working on a task on the project's critical path. The planned execution time is 4 hours ($t_{plan} = 240\ min$). During this period, the developer receives two interruptions via Slack from adjacent teams.

Initial data of the specialist: cognitive viscosity coefficient $\sigma = 0{,}8$ (high architectural complexity); baseline recovery time $t_{base} = 15\ min$; current cognitive debt $D_{C_{start}} = 0$.

Loss calculation:

1.1. First interruption → Occurred after 60 minutes of deep focus ($t_{flow} = 60$).

1.2. Cognitive debt increase →

$\Delta D_{C_1} = 0{,}8 \cdot 60 = 48\ min$

1.3. Re-concentration time →

$\tau_{rec_1} = 15 \cdot (1 + ln(1 + 0.8 \cdot 48)) \approx 70\ min.$

2.1. Second interruption → Occurred 30 minutes after recovery.

2.2. Cognitive debt increase →

$\Delta D_{C_2} = 0{,}8 \cdot 30 = 24\ min\ (total\ \ D_C = 72\ min).$

2.3. Re-concentration time →

$\tau_{rec_2} = 15 \cdot (1 + ln(1 + 0{,}8 \cdot 72)) \approx 76\ min.$

3. Systemic impact on the project. Actual task duration and systemic impact (t_{fact}) increased from 240 minutes to →

$240 + 70 + 76 = 386\ min$ (approximately 6.5 hours).

Since the developer is on a critical node, these 146 minutes of delay automatically translate into idle time (t_{idle}) for three testers waiting for the module release. The total cost of interruption (CoI_{total}) for the team is:

$146\ min\ (developer) + 3 \cdot 146\ min\ (testers) =$
$= 584\ person - min\ (almost\ 10\ hours\ of\ work).$

Outcome. By identifying this risk through formula (5), the decision support system records that the probability of a sprint (Agile process) deadline violation has risen to 45%. The manager receives a recommendation to activate a «cognitive quarantine» – a complete blocking of non-critical communications for this node until the end of the workday.

Conclusions. The proposed study presents a comprehensive scientific concept that offers a qualitatively new perspective on efficiency in modern software engineering. A key advantage of the developed method is the shift from viewing a specialist as a static resource with fixed productivity to a dynamic «cognitive profile» model that accounts for mental fatigue, contextual complexity, and the cumulative effect of distractions.

The study convincingly demonstrates that traditional Agile metrics only capture actual delays, whereas the use of cognitive debt and cost-of-interruption metrics allows management to operate with leading risk indicators. This transforms the management process from reactive error correction to proactive modeling of the «safety margin» of each work cycle.

The scientific novelty lies in formalizing cascading delays through cognitive viscosity on the critical path of the project graph, providing a solid foundation for developing intelligent decision support systems. Implementing such tools allows managers to justify

measures like «cognitive quarantine» and dynamic rescheduling, protecting the most valuable asset of an IT project – the developers' state of deep concentration.

The practical significance of the method is confirmed by its ability to quantitatively assess the systemic impact of communication noise, which is critical for cognitively intensive projects with complex logical dependencies. Thus, the study not only addresses the urgent issue of minimizing time losses but also contributes to the development of a mathematically precise approach to human resource management in the digital age, ensuring high predictability of intellectual product delivery without risking team burnout.

References

1. Parnin, C., Görg, C., & Rugaber, S. (2010). CodePad: interactive spaces for maintaining concentration in programming environments. *In Proceedings of the 5th international symposium on Software visualization (SOFTVIS '10). Association for Computing Machinery,* New York, NY, USA, pp. 15–24. Available at: https://doi.org/10.1145/1879211.1879217(Accessed 14 January 2026)
2. Parnin, C., & Rugaber, S. (2012). Programmer information needs after memory failure. *2012 20th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC),* Passau, Germany, pp. 123-132, Available at: https://doi.org/10.1109/ICPC.2012.6240479 (Accessed 14 January 2026)
3. Mehrotra, A., Hendley, R., & Musolesi, M. (2017). Interpretable Machine Learning for Mobile Notification Management: An Overview of PrefMiner. *GetMobile: Mobile Comp. and Comm*, 21 (2), pp. 35–38. Available at: https://doi.org/10.1145/3131214.3131225 (Accessed 15 January 2026)
4. Mehrotra, A., & Musolesi, M. (2018). Intelligent Notification Systems: A Survey of the State of the Art and Research Challenges. *Computer Science. Human-Computer Interaction.* https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.10171 (Accessed 15 January 2026)
5. Bazinette, V., Cohen, N. H., & Ebling M. R., et al. (2001). An Intelligent Notification System. *IBM Research Report.* Available at: https://www.researchgate.net/publication/228970929_An_intelligent_notification_system (Accessed 14 January 2026)
6. Ziuziun, V. (2026). Substantiation of the Concept of Cognitive Viscosity for Optimizing AGILE Team Management. *Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «Scientific Innovation: Theoretical Insights and Practical Impacts»,* January 19–21, 2026, Naples, Italy, P. 69-73. Available at: https://doi.org/10.70286/EOSS-19.01.2026.001.69-73 (Accessed 14 January 2026)
7. Needham M., & Hodler, A. E. (2019). Graph Algorithms. Practical Examples in Apache Spark and Neo4j. Available at: https://web4.ensiie.fr/~stefania.dumbrava/GraphAlgorithms.pdf (Accessed 15 January 2026)
8. Wilson, R. J. (1996). Introduction to Graph Theory. Available at: https://webhomes.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/wilsongraph.pdf (Accessed 14 January 2026)
9. Carzaniga, A. (2025). Elements of Queuing Theory. Available at: https://www.inf.usi.ch/carzaniga/edu/adv-ntw/queuing-theory-notes.pdf (Accessed 15 January 2026)
10. Sharma, S., & Kumar, V. A. (2022). Comprehensive Review on Multi-objective Optimization Techniques: Past, Present and Future. *Arch Computat Methods.* Eng 29, 5605–5633. Available at: https://doi.org/10.1007/s11831-022-09778-9 (Accessed 15 January 2026)
11. Sharifi, M. R., Akbarifard, S., & Qaderi, K. et al. (2021). A new optimization algorithm to solve multi-objective problems. Sci Rep 11, 20326. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-021-99617-x (Accessed 14 January 2026)
12. Lapeyre, B. (2021). Monte Carlo Methods and Stochastic Algorithms. Available at: https://cermics.enpc.fr/~bl/monte-carlo/poly.pdf (Accessed 15 January 2026)
13. Ziuziun, V., Kulkovets, V., & Parasiuk, L. (2024). Development of a Decision Support Information System for Managing Large Agile Teams in IT Projects. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, 4(497), 166-172, Available at: https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).23 (Accessed 15 January 2026)
14. Ziuziun, V. & Petrenko, N. (2025). AI-Enhanced System Design for Agile Sprint Management and Velocity Prediction. *2025 IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST),* Astana, Kazakhstan, pp. 1-6, Available at: https://doi.org/10.1109/SIST61657.2025.11139278 (Accessed 15 January 2026)
15. Ziuziun, V. Exploring the concept of derivative risks arising from external influences in the context of business operations and their strategic stability. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, 2024, 2(9), pp. 27-34. Available at: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.9.4 (Accessed 15 January 2026)

Received (надійшла) 28.01.2026

Відомості про автора / About the Author

Зюзюн Вадим Ігорович (Ziuziun Vadym Ihorovych) – кандидат технічних наук (PhD), доцент, доцент кафедри технологій управління, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна; e-mail: vadym.ziuziun@knu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6566-8798.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

УДК 004.45 + 004.67 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.6

М. В. ЄВЛАНОВ, В. В. ШУТЬКО

РОЗРОБКА БАЗОВОЇ МОДЕЛІ ВИБОРУ СТРАТЕГІЇ ХМАРНОЇ МІГРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Хмарна міграція інформаційних системи наразі є одним з критичних перехідних етапів розвитку підприємства на шляху до цифрової трансформації. Розглянуто проблему вибору стратегії хмарної міграції інформаційної системи на передміграційній стадії як задачу досягнення цільових характеристик якості та продуктивності, прийнятного рівня витрат і керованості впровадження в умовах обмежених вихідних даних. Визначено, що наявні підходи до планування міграції часто є різноплановими та фрагментарними. Запропоновано формалізацію вибору стратегії як порівняння альтернатив у спільному просторі ключових показників ефективності. Введено цільовий профіль показників як набір мінімально прийнятних порогових значень після міграції, а також ваги важливості, які відображають пріоритети зацікавлених сторін і дозволяють явно фіксувати, які вимоги є критичними. Визначено придатність кожної альтернативи мірою недосягнення цільових порогів за показниками, де прогнозований стан не відповідав вимогам. Враховано компроміс між досягненням цільового профілю та складністю реалізації, що дозволив контролювати баланс між очікуваними покращеннями і ресурсними витратами на перетворення інформаційної системи. Виконано експериментальну перевірку моделі на заданому наборі вхідних даних, що підтвердило детермінованість і відтворюваність результатів. За фіксованих початкових значень показників, правил нормування, порогових цілей, ваг важливості та параметрів компромісу модель формувала однозначне ранжування стратегій і дозволила ідентифікувати, які показники формували основний дефіцит та в яких напрямах необхідні зміни для його зменшення. Обґрунтовано, що така постановка підсилила прозорість та аргументованість вибору стратегії хмарної міграції. Подальші напрями дослідження визначено як калібрування параметрів моделі на емпіричних прикладах, аналіз чутливості результатів до ваг і порогів, урахування невизначеності прогнозів показників, а також розширення механізмів сценарного порівняння, щоб підвищити переносимість рекомендацій для різних доменів і типів інформаційних систем.

Ключові слова: інформаційна система, ключові показники ефективності, модель, стратегія, хмарна міграція.

M. IEVLANOV, V. SHUTKO

DEVELOPMENT OF A BASIC MODEL FOR CHOOSING AN INFORMATION SYSTEM CLOUD MIGRATION STRATEGY

Cloud migration of information systems is currently one of the critical transitional stages of enterprise development on the way to digital transformation. The problem of choosing a strategy for cloud migration of the information system at the pre-migration stage is considered as a task of achieving the target characteristics of quality and productivity, an acceptable level of costs and manageability of implementation in conditions of limited initial data. It is determined that the existing approaches to migration planning are often diverse and fragmented. The formalization of the choice of strategy as a comparison of alternatives in the common space of key performance indicators is proposed. The target indicator profile is introduced as a set of minimum acceptable thresholds after migration, as well as important weights that reflect the priorities of stakeholders and allow you to explicitly capture which requirements are critical. The suitability of each alternative as a measure of failure to achieve the target thresholds for indicators where the predicted state did not meet the requirements is determined. The compromise between the achievement of the target profile and the complexity of implementation is considered, which made it possible to control the balance between the expected improvements and resource costs for the transformation of the information system. Experimental verification of the model on a given set of input data was performed, which confirmed the determinism and reproducibility of the results. With fixed initial values of indicators, normalization rules, threshold goals, weights of importance and compromise parameters, the model formed an unambiguous ranking of strategies and made it possible to identify which indicators formed the main deficit and in which directions changes were needed to reduce it. It is substantiated that such a formulation strengthened the transparency and reasoning of the choice of a cloud migration strategy. Further areas of research are defined as calibration of model parameters on empirical examples, analysis of the sensitivity of results to weights and thresholds, considering the uncertainty of indicator forecasts, as well as expanding the mechanisms of scenario comparison to increase the portability of recommendations for different domains and types of information systems.

Keywords: cloud migration, information system, key performance indicators, model, strategy.

Вступ. Хмарна міграція інформаційних систем (ІС) у сучасній цифровій трансформації розглядається не лише як технічне перенесення компонентів у середовище провайдера, а як комплексна зміна способу керування обчислювальними ресурсами, ризиками та економікою цифрової інфраструктури компаній. Саме тому найбільш критичним стає етап передміграційного планування, де формуються цілі міграції, очікувані показники результативності та обмеження бізнесу, а також закладаються припущення щодо майбутніх профілів навантаження й операційних витрат. Практика показує, що без формалізованого планування організації часто входять у міграцію без належно обраної стратегії через низку факторів, що створює високий ризик помилок у подальших технічних і фінансових рішеннях.

На передміграційній стадії однією з ключових прикладних проблем є оптимізація витрат ресурсів для планування (часових та фінансових витрат, Net Present Value, NPV), потрібних для підготовки доказової бази щодо доцільності міграції, одночасно зі збереженням прийнятної точності оцінок. Тут виникає суперечність: щоб обґрунтувати рішення, потрібно зібрати дані про наявну IT-інфраструктуру, взаємозалежності застосунків, пікові режими роботи та приховані статті витрат, але сам збір і валідація цих даних є дорогим та тривалим процесом, особливо на рівні портфеля застосунків. Відповідно, дослідження, що орієнтовані на портфельне оцінювання та врахування «прихованих витрат» прямо підкреслюють потребу у попередніх оцінках як механізмі зниження ризику перевитрат бюджету та зриву строків [1].

© М. В. Євланов, В. В. Шутько, 2026

Другою проблемою є невизначеність продуктивності та масштабованості цільового середовища, яка напряму впливає на вибір стратегії міграції. Якщо планування спирається на усереднені або нерепрезентативні профілі навантаження, організація ризикує або переплатити за надмірне резервування потужностей, або отримати деградацію продуктивності ІС після перенесення. У цьому контексті важливими є методи емпіричного бенчмаркінгу, які пропонують виконувати контрольовані експерименти для різних комбінацій типу «навантаження × ресурси» і перевіряти досягнення визначених угод про рівень сервісу (Service Level Agreement, SLA), але водночас керувати компромісом між відтворюваністю результатів і практичною вартістю (часом) таких експериментів. Це задає науково обґрунтовану основу для передміграційного аналізу та зіставлення варіантів розгортання ще до фактичного перенесення ІС [2].

Окремо постає проблема вибору стратегії хмарної міграції та доведення її раціональності для бізнесу. На практиці стратегія не зводиться до «техніки перенесення», а вимагає багатокритеріального компромісу між витратами, очікуваними вигодами, ризиками, організаційною готовністю та регуляторними вимогами. У цьому напрямі релевантними є гібридні фреймворки прийняття рішень, які поєднують кількісну економічну аргументацію (зокрема фінансові оцінки на кшталт чистої поточної вартості) з експертними процедурами, придатними для неповних або «нечітких» вимог на ранній стадії. Такий клас підходів важливий тим, що переводить обґрунтування стратегії з рівня інтуїтивних припущень у рівень відтворюваного прийняття рішень, де видно логіку вибору та джерела невизначеності [3].

Потенційна вигода від вирішення останньої проблеми полягає у зниженні невизначеності та витрат на прийняття рішень на передміграційній стадії. Так, формалізоване планування дозволило б скоротити час і фінансові витрати на підготовку доказової бази, підвищити відтворюваність оцінок витрат і прогнозів продуктивності. Зменшення ймовірності хибного вибору стратегії та, як наслідок, мінімізація ризиків перевитрат бюджету, зриву строків і накопичення технічного боргу після перенесення ІС було б другою перевагою. Актуальність дослідження зумовлена тим, що хмарні платформи стають базовою інфраструктурою цифрових сервісів, архітектури ІС ускладнюються, а регуляторні та безпекові вимоги посилюються, тому фрагментарний підхід до планування стає дедалі менш релевантним. Таким чином підкреслюється необхідність проведення наукових досліджень саме за цією проблемою.

Аналіз літературних джерел. У [1] Було запропоновано розширений фреймворк Cloud Computing Considerations for Companies (CCCC) для передміграційного планування на рівні портфеля застосунків із додатковими фазами Application Portfolio Profiling (APP) та Application Portfolio Assessment (APA), де формувалися базові лінії навантаження і конфігурацій, виконувалася портфельна оцінка та надавалися рекомендації щодо розміщення у публічній/приватній хмарі (Technical Platform Recommendation, TPR) і варіанта перенесення «as-is» або з модернізацією; ухвалення рішення підтримувалося Cloud Decision Framework на основі Rule-based Reasoning (RBR) і Case-based Reasoning (CBR), а фінансове обґрунтування оформлювалося через Financial Viability Assessment (FVA) як «bottom-up» оцінювання витрат.

Перевагами запропонованого підходу було те, що він систематизував планування у вимірюваних параметрах портфеля, підвищував стійкість рішень за неповних вимог завдяки RBR/CBR та забезпечував більш повну картину витрат за рахунок FVA.

Однак, недоліками такого підходу було те, що він зосереджував рішення переважно на виборі платформи (публічна/приватна хмара) та загального варіанта перенесення («as-is» або з трансформацією), тоді як вибір між альтернативами різної глибини перетворень залишався слабко параметризованим і не завжди забезпечував прозору, відтворювану аргументацію компромісу між витратами, вигодами та ризиками. Оскільки RBR спиралося на експертну класифікацію критеріїв як «Required/Optional», рекомендації суттєво залежали від суб'єктивних трактувань критичності вимог, що ускладнювало стандартизацію та порівнюваність рішень. CBR, за браку релевантних прецедентів, могло пропонувати формально подібні аналогії, які не відображали ключових обмежень, знижуючи надійність висновків за неповних ранніх даних.

У [2] було запропоновано формалізувати оптимізацію ресурсів на передміграційній стадії як серію SLO-експериментів (Service Level Objective, ціль рівня обслуговування), де перевірялося, чи здатна ІС з фіксованою ресурсною конфігурацією витримати задану інтенсивність навантаження з одночасним виконанням усіх SLO. Для цього ІС розгорталася з певними ресурсами, генерувався сталий потік навантаження, моніторилися метрики з відкиданням інтервалу «розігріву», виконувалися повтори, а результати агрегувалися відповідно до конкретного SLO. Далі оцінювалися дві функції масштабованості – мінімально достатні ресурси для кожного рівня навантаження («метрика попиту») та максимальна інтенсивність навантаження для кожної конфігурації («метрика ємності»), що використовувалося для оптимального підбору розміру та кількості хмарних ресурсів.

Перевагами запропонованого підходу було те, що він задавав кількісно відтворювану процедуру, де досяжність вимог інтерпретувалася безпосередньо через SLO/KPI як «виконується/не виконується», а доказовість і вартість оцінювання керувалися параметрами експериментів та стратегією пошуку.

Однак, недоліками такого підходу було те, що прискорені стратегії спиралися на припущення «більше ресурсів означає не гірше виконання SLO», яке могло порушуватися (зокрема для подія-орієнтованих мікросервісів), створюючи ризик хибних рекомендацій при автоматизованому звуженні пошуку. Додатково метод вимагав репрезентативного навантаження, коректних SLO та стабільного експериментального середовища, тому переносимість висновків між контекстами обмежувалася. Також підхід переважно обґрунтовував ресурсну достатність і альтернативи розгортання, але не давав формалізованого механізму переходу до варіантів глибших перетворень, коли SLO досяжні лише за високої ціни або нестабільної поведінки.

У [3] було запропоновано комплексну модель прийняття рішення для планування хмарної міграції, у якій бізнес-процес формалізувався, а функціональні та нефункціональні вимоги переводилися у вимірювані критерії, зокрема пов'язані з профілем навантаження та споживанням ресурсів. У моделі «шаблон використання» трактувався як визначальний чинник варіанта розгортання. Ресурсні потреби класифікувалися як передбачувані та непередбачувані, для короткочасних піків обґрунтовувалася доцільність використання еластичних ресурсів, а прогнозування часових рядів пропонувалося для побудови передміграційної «пісочниці» оцінювання майбутніх потреб. Оптимізаційна частина реалізовувалася через порівняння альтернативних сценаріїв у термінах сукупної вартості та ризик-втрат. Зменшення суб'єктивності підтримувалося поєднанням Delphi з методом аналізу ієрархій (Analytical Hierarchy Process, AHP – для попарного порівняння у структурі багатокритеріального вибору); практичність демонструвалася NPV-аналізом із висновком на користь приватного дата-центру в довгостроковій перспективі та гібридного розгортання для пікових режимів.

Перевагами запропонованого підходу було те, що він поєднував ресурсне планування з економічною аргументацією в єдиній процедурі та підтримував багатокритеріальне зіставлення альтернатив із частковим керуванням суб'єктивністю через Delphi і AHP.

Однак, недоліками такого підходу було те, що ключові «втрати» та приховані загрози (зокрема vendor lock-in, витрати на повторне розгортання) переважно ідентифікувалися та оцінювалися експертно, а отже залишалися організаційно-залежними і важко відтворюваними у стандартизованому вигляді. Навіть за наявності Delphi та AHP зберігалася невизначеність, оскільки AHP суттєво залежав від суджень і досвіду аналітиків, що могло змінювати ваги критеріїв і підсумкове ранжування сценаріїв при повторенні оцінювання іншою групою. Додатково під час оцінювання сценаріїв частина змінних могла ігноруватися або пом'якшуватися залежно від дизайну системи та типу розгортання, що підвищувало гнучкість, але послаблювало стандартизацію, порівнюваність і переносимість результатів між різними кейсами, особливо коли потрібно узгоджено зіставляти альтернативи з різними профілями ризиків і вигод.

У [4] було запропоновано практико-орієнтований підхід до передміграційного планування перенесення on-premises веб-застосунків у хмару, у якому ключовою задачею вважалося точне оцінювання та подальша оптимізація витрат, а реалізацію було цілеспрямовано звужено до Amazon Web Services (AWS). У межах цього фокусу були сформовані AWS-орієнтовані моделі оцінювання вартості типових сервісів і ресурсів на основі документації з ціноутворення та калькуляторів AWS. Описано використання CloudWatch, Cost Explorer і Trusted Advisor для аналізу трендів витрат і патернів споживання, а оптимізацію формалізовано як мінімізацію загальної вартості (обчислення, сховище, перенесення даних, резервне копіювання, мережеві компоненти та «ефект зв'язків» між конфігураціями). Для пошуку близькооптимальних конфігурацій було застосовано гібридний алгоритм GA-SA (Genetic Algorithm – Simulated Annealing) з перевіркою на 17 еталонних benchmark-функціях.

Перевагами запропонованого підходу було те, що він задавав формалізовану, інтерпретовану модель витрат і механізм пошуку економічно кращих конфігурацій у межах конкретного хмарного провайдера.

Однак, недоліками такого підходу було те, що звуження до AWS знижувало переносимість результатів на мультихмарні або альтернативні сценарії та робило висновки чутливими до змін у моделях ціноутворення й сервісних політиках AWS. Додатково ефективність GA-SA була продемонстрована на абстрактних benchmark-функціях, що не гарантувало аналогічної якості на реальних профілях навантаження та під реальними міграційними обмеженнями, тобто залишалася методологічна прогалина між синтетичним тестом і польовою перевіркою. Також модель була зорієнтована переважно на витратні компоненти, через що при зіставленні альтернатив із різною глибиною перетворень (lift-and-shift, re-platforming, re-architecting) вимагався додатковий набір критеріїв для узгодженого врахування очікуваних вигод, ризиків і нефінансових обмежень, а не лише мінімізації вартості.

У [5] було подано емпірично обґрунтовану «карту» міграції до мікросервісної архітектури в хмарі як довготривалого ітеративного процесу з двома взаємопов'язаними режимами змін: системним (стратегічним, організаційним і архітектурним) та технічним (операційним, реалізаційним, спринтовим), які відбувалися паралельно. Для обох режимів було виокремлено планування, виконання, побудова підтримувальних артефактів, а міграційні дії були структуровані у вигляді 14 активностей (6 – системні, 8 – технічні), конкретизованих через 53 «solution outcomes» як типові результати інженерної та

управлінської роботи. Емпірична база поєднувала 19 інтерв'ю з практиками (16 компаній) та ручний аналіз 215 дискусій із ресурсу StackOverflow із застосуванням технік «grounded theory» (обґрунтована теорія).

Перевагами запропонованого підходу було те, що він задавав узгоджений опис планування та координації міграції на системному й технічному рівнях у формі прикладних активностей і конкретних результатів, зменшуючи фрагментарність рекомендацій щодо переходу до мікросервісів.

Однак, недоліками такого підходу було те, що модель мала переважно описово-процедурний характер і не задавала кількісної, відтворюваної процедури зіставлення альтернатив за витратами, очікуваними вигодами та ризиками, через що її важко було використовувати для формалізованого обґрунтування вибору між варіантами різної глибини перетворень. Додатково репрезентативність інтерв'ю не гарантувалася через добір з персональних мереж і добровільну участь, що могло зміщувати набір активностей та «solution outcomes» у бік типових практик конкретних середовищ. Також використання даних зі StackOverflow потенційно підсилювало домінування інженерних перспектив, через що управлінські, організаційні та регуляторні обмеження могли бути недопредставлені, а отже частина критичних факторів, що впливають на вибір стратегії міграції, могла не бути зафіксована в моделі.

У [6] було запропоновано підхід до міграції критичних SAP-рішень (Systems, Applications, and Products in Data Processing, німецька компанія-розробник програмного забезпечення) і баз даних з on-premises до Microsoft Azure. Підхід центрований на відмовостійкій цільовій архітектурі та поетапній організації переходу через фази оцінювання, планування, виконання та подальшої оптимізації. Передміграційне планування реалізовувалося інструментально через Azure Migrate для аналізу залежностей, оцінювання продуктивності й попередньої оцінки вартості, із використанням Azure Site Recovery для безперервності/відновлення та Database Migration Service для перенесення СУБД з мінімальним простоєм. Додатково формувався інвентар застосунків і БД із взаємозалежностями та еталон метрик «до/після» для верифікації. Вибір подавався як застосування lift-and-shift для швидкого перенесення без суттєвих модифікацій або re-architecting із рефакторингом під «cloud-native» можливості (включно з мікросервісними та «serverless» підходами), а післяміграційна оптимізація підтримувалася Azure Monitor, Azure Cost Management, Reserved Instances та Autoscale.

Перевагами запропонованого підходу було те, що він задавав практично відтворюваний покроковий сценарій, підкріплений конкретними Azure-інструментами, і акцентував вимоги високої доступності, відновлення, мультирегіональності та регуляторної відповідності.

Однак, недоліками такого підходу було те, що вибір обмежувався двома високорівневими сценаріями (lift-and-shift або re-architecting) без багатокритеріальної методики, вагових коефіцієнтів і формалізованих порогів прийнятності, через що логіка зіставлення альтернатив залишалася недостатньо прозорою та важко відтворюваною. Попри наявність окремих KPI-орієнтирів, не було запропоновано кількісної моделі, яка б явно пов'язувала характеристики ІС/компонентів із KPI та процедурою обґрунтування вибору, тому економічні й ризикові аргументи залишалися переважно описовими. Додатково специфічність до Microsoft Azure знижувала переносимість на мультихмарні стратегії або інші платформи, а твердження про економічний ефект подавалися як загальні оцінки без демонстрації на конкретному прикладі міграції.

У [7] було запропоновано міграційно-орієнтований механізм балансування навантаження в IaaS-середовищі (Infrastructure as a Service, інфраструктура як сервіс), у якому оптимізація використання ресурсів досягалася через прогнозування майбутніх навантажень і подальший підбір цільових міграцій віртуальних машин (VM). Рішення будувалося на інтеграції gene expression programming (GEP), що формувало регресійні моделі навантаження VM, та GA, який на основі прогнозів обирав перепризначення VM на фізичні хости (VMH) для вирівнювання навантаження після міграцій. Оптимізація формалізувалася функцією пристосованості, яка агрегувала мінімізацію вартості міграцій та максимізацію збалансованості за умови відсутності прогнозного перевантаження. Алгоритм викликався періодично, а поточний стан використовувався як відправна точка. Перевірка виконувалася в реальному середовищі за метриками Load-Balance status (LB) і Balancing Efficiency (BE).

Перевагами запропонованого підходу було те, що оптимізація спиралася на прогнозний стан інфраструктури після міграцій і явно враховувала вартість міграцій як керований параметр, що підвищувало контрольованість компромісу між стабільністю сервісу та якістю вирівнювання.

Однак, недоліками такого підходу було те, що він описував переважно операційну оптимізацію розміщення VM у межах IaaS і не давав критеріїв для зіставлення альтернатив із різною глибиною перетворень системи, оскільки «вартість» у моделі інтерпретувалася як штраф за міграцію VM, а не як повний економічний ефект або сукупні витрати переходу. Також фокус на CPU-навантаженні й централізованому балансуванні без урахування мережі, пам'яті чи графічного процесора обмежував придатність моделі для реальних багаторесурсних профілів, де рішення про доцільність і «раціональність» перенесення визначається комплексом ресурсних і нефункціональних обмежень. Додатково застосованість підхожу була обмежена малим масштабом експериментів та використанням штучно згенерованих даних.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

У [8] було запропоновано підхід CIPM (Continuous Integration of architectural Performance Models with parametric dependencies), орієнтований на підтримку передпроєктних і передексплуатаційних рішень щодо конфігурації ІС на основі архітектурної моделі продуктивності. CIPM забезпечував сценарний аналіз «what-if» для різних варіантів навантаження, дизайну та розгортання, а оптимізацію ресурсів реалізовував через безперервне підтримання актуальності параметризованої моделі. Замість повного перерахунку після змін виконувалося інкрементальне калібрування лише «зачеплених» параметрів із застосуванням адаптивного моніторингу та самовалідації, яка контролювала точність прогнозів і ініціювала перекалібрування неточних фрагментів. Для уточнення параметричних залежностей використовувалися статистичні методи.

Перевагами такого підходу було те, що він дозволяв обґрунтовувати потреби в ресурсах і продуктивності на основі архітектурних прогнозів та зменшувати вартість спостережуваності завдяки інкрементальному калібруванню й самовалідації, зберігаючи придатність для порівняння альтернатив без суцільних експериментів.

Однак, недоліками такого підходу було те, що він фокусувався переважно на продуктивності та ресурсоспоживанні, тому зіставлення альтернатив різної глибини перетворень не задавалося як формалізована процедура і вимагало додаткового набору критеріїв (вартість, ризики, залежності), без якого аргументація могла вважатися суб'єктивною. Додатково застосування CIPM вимагало наявності артефактів архітектурного моделювання та коректного співставлення між моделлю і кодом, а також передбачало ручні рішення для усунення неоднозначностей у побудові System Model, що знижувало відтворюваність і ускладнювало масштабування на великі проєкти. Нарешті, залежність від циклів налаштування і збору телеметрії могла обмежувати практичність у середовищах із жорсткими обмеженнями на експерименти або спостережуваність, що зменшувало надійність прогнозів і, відповідно, обґрунтованість альтернатив.

У [9] було запропоновано ієрархічну кількісну модель Cloud-QM, побудовану на основі стандартів ISO 250nn (SQuaRE) та розширену хмарно-специфічними атрибутами, де структуру моделі сформовано через Delphi-процедуру узгодження експертних суджень. Модель задавала стандартизоване оцінювання альтернативних хмарних продуктів за ієрархією «вимір якості – підвимір – метрика» та формалізованими KPI з правилами інтерпретації. В контексті ресурсів і еластичності були введені метрики Resource Behavior (мінімально потрібні RAM, CPU та дискова пам'ять) і Resource Allocation Adjustment (час масштабування та діапазон кроку виділення пам'яті на клієнта). Застосування моделі було продемонстровано через порівняння двох продуктів, а вибір інтерпретувався як обґрунтоване ранжування цільового продукту з урахуванням бізнес-обмежень.

Перевагами такого підходу було те, що він забезпечував структуроване й порівняльне оцінювання альтернатив на основі стандартизованих KPI, знижуючи довільність інтерпретацій та підсилюючи відтворюваність висновків щодо ресурсних вимог, еластичності, переносимості та відповідності регуляторним умовам.

Однак, недоліками такого підходу було те, що валідацію було виконано лише на PaaS-кейсах, а Delphi-узгодження спиралося на невелику групу експертів, що обмежувало узагальнюваність і стійкість ієрархії метрик та їх інтерпретацій у ширших контекстах. Також у моделі не були зафіксовані ваги вимірів якості, через що відсутній формалізований механізм узгодження компромісів між групами критеріїв. Додатково «ресурсна оптимізація» мала переважно порівняльний характер і залежала від доступності коректних вихідних даних, тому за дефіциту або неоднорідності даних доказовість оцінок знижувалася. Нарешті, використання «грубих» шкал для частини характеристик (зокрема бінарних ознак) могло зменшувати чутливість моделі для близьких за властивостями альтернатив і ускладнювати диференціацію варіантів, коли потрібна точна аргументація вибору.

У [10] було запропоновано підхід до передміграційного планування для serverless-міграцій (Function as a Service, FaaS), де оптимізація ресурсів формалізувалася як задача прогнозування продуктивності та вартості з подальшим підбором конфігурацій. Для цього вводилася conditional stochastic Petri net (CSPN) і застосовувалося семплювання для отримання розподілів часу відгуку та вартості з фокусом на SLA для tail latency і high-percentile cost. Оптимізацію реалізовано як вибір пам'яті для кожної функції через задачі Best Cost under Performance Constraint (BCPC) та Best Performance under Budged Constraint (BPBC), а параметри підбиралися алгоритмом Depth-First Bottleneck Alleviation (DFBA) у циклі «профілювання → пошук вузького місця → алокація ресурсу → перепрофілювання», прив'язаному до моделі оплати AWS Lambda та послідовностей викликів із production-логів/trace-файлів або синтезованих даних.

Перевагами такого підходу було те, що він формалізував передміграційні рішення як задачі оптимізації з явними обмеженнями та враховував «хвостові» характеристики розподілів (tail latency, high-percentile cost), знижуючи ризик прийняття рішень лише за середніми метриками.

Однак, недоліками такого підходу було те, що його точність і доказовість критично залежали від репрезентативності логів/навантаження та достатності ітерацій профілювання, а на ранніх етапах міграції ці дані часто є неповними або нестабільними, що послаблювало надійність обґрунтування конфігурацій. Додатково оптимізаційна модель покривала «стратегію» переважно у вузькому сенсі

налаштування ресурсів FaaS (насамперед пам'яті) і не забезпечувала узгодженого вибору між альтернативними класами розгортання IaaS/PaaS/FaaS, коли потрібне зіставлення різних типів перетворень і супутніх ризиків. Також сильна прив'язка до актуальної моделі оплати AWS Lambda підвищувала чутливість до еволюції платформи: зміни в ціноутворенні або поведінці сервісу могли погіршувати переносимість і точність моделі, що вимагало регулярної адаптації методу для збереження коректності оцінок.

Таким чином, стан вирішення проблеми доцільно трактувати як частково зрілий на рівні окремих компонентів. По-перше, при переході від теорії до практики, розглянуті рішення є надто різноплановими та не зводяться до одного єдиного. По-друге, розглянуті підходи є в своїй суті фрагментарними, тобто вони подаються як окремі інструменти вирішення загальної проблеми і рідко інтегруються в 1 універсальний підхід. Виходячи з цього можна зробити висновок щодо необхідності подальших досліджень даної проблеми.

Мета статті. Метою статті є формалізація задачі оптимізації ресурсів на передміграційному етапі планування хмарної міграції ІС шляхом розроблення та обґрунтування KPI-орієнтованого підходу до планування, який забезпечуватиме прозоре для бізнесу зіставлення альтернатив і формалізований вибір стратегії хмарної міграції на основі вимірюваних показників ефективності з відтворюваністю результатів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі задачі дослідження:

- розробити KPI-орієнтовану модель вибору стратегії хмарної міграції;
- провести експериментальне дослідження моделі.

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є стратегії хмарної міграції ІС. Предметом дослідження є процес вибору стратегії хмарної міграції ІС. Основна гіпотеза дослідження полягає у тому, що для відтворюваного вибору оптимальної стратегії хмарної міграції на передміграційному етапі недостатньо лише зафіксувати KPI «до/після» (як було наведено у [5], [6], [8]), а необхідно сформувати базову кількісну модель ІС, у якій характеристики навантаження, ресурсні профілі та архітектурні залежності системи переводяться у набір нормованих KPI й фінансових показників (витрати/ефект), а також доповнюються оцінками ризиків і обмежень. За такої побудови різні альтернативи міграції можуть бути зіставлені в єдиній процедурі як багатокритеріальний компроміс, що робить обґрунтування вибору прозорим і порівнюваним між кейсами.

У передміграційній фазі ключовою була потреба швидко й відтворювано порівняти альтернативи, маючи неповні відомості про майбутню архітектуру та обмежений час на глибокі експерименти. Саме тому доцільним виявився вибір математико-алгоритмічної статичної моделі, що дозволило описати ІС «знімком» поточного стану, а наслідки стратегій задати як очікувані зміни цих KPI з подальшим формалізованим ранжуванням альтернатив. Такий підхід добре узгоджувався з логікою планування, де потрібні первинна оцінка придатності, узгодження з бізнес-цілями та попередня оцінка витрат і досяжності вимог, а не детальна часово-динамічна симуляція всіх процесів міграції. Отже, вибір математико-алгоритмічної статичної моделі в передміграційному контексті був виправданий тим, що вона забезпечувала швидке порівняння стратегій за бізнес-орієнтованими KPI. Це сприяло прозорості результату через внески метрик з відповідними вагами, і створювала основу для ранньої оцінки досяжності цільових рівнів та прийнятності витрат [1].

Одним з ключових припущень було те, що ІС можна описувати не через повний архітектурний рівень деталізації компонентів, а через набір вимірюваних KPI, які відображали результат її роботи з позиції бізнесу та експлуатації. Таке припущення було зумовлене практичними обмеженнями передміграційного аналізу: відтворення архітектури, залежностей і сценаріїв навантаження потребувало значних ресурсів, тоді як KPI зазвичай були доступні з моніторингу та звітності й могли використовуватися як стислий опис стану ІС. Вважалося, що обраний набір KPI є достатнім для порівняння стратегій, тобто наслідки міграції повинні проявлятися через зміну цих показників.

Окремо було прийнято, що різні за природою KPI можна зробити порівнюваними, якщо уніфікувати напрям інтерпретації «краще–гірше» та виконати нормування в межах узгоджених діапазонів. Такі діапазони трактувалися як практично обґрунтовані орієнтири, що задавалися історичними значеннями, бенчмарками або вимогами SLO/SLA. Це дозволило уникнути ситуації, коли метрики з більшими числовими масштабами «переважали» інші, та створити спільний простір для зіставлення альтернатив.

Для збереження зрозумілості та відтворюваності результатів було прийнято, що оцінки ефектів стратегій задавалися або на основі узагальнених спостережень з кейсів міграції, або як експертні оцінки з подальшим уточненням у міру накопичення даних. На початковому етапі невизначеність і варіативність середовища були враховані спрощено: аналіз виконувався в детермінованій постановці як порівняння очікуваних (середніх) ефектів, а ризики невиконання KPI відображалися через факт недосягнення порогів. Таке припущення було обрано як стартове, оскільки воно дозволяло отримати базовий консультативний інструмент і визначити критичні показники та пороги для прийняття рішення.

Розробка KPI-орієнтованої моделі вибору стратегії хмарної міграції ІС. Стан ІС до міграції

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

було подано у вигляді вектора-стовпця ключових показників ефективності, які відображали результати функціонування системи з позиції продуктивності, надійності, масштабованості та сукупних витрат володіння. Векторне подання було використано для одночасного врахування декількох критеріїв, що могли конфліктувати між собою, і для подальшого формалізованого порівняння альтернативних стратегій і відображалося як:

$$KPI^{base} = \begin{bmatrix} kpi_1^{base} \\ \dots \\ kpi_m^{base} \end{bmatrix},$$

де kpi_i^{base} – базове значення показника ефективності до міграції;

m – кількість показників ефективності ІС.

Мінімально прийнятний рівень якості після міграції було задано у вигляді порогового вектора-стовпця KPI^{target}.

$$KPI^{target} = \begin{bmatrix} kpi_1^{target} \\ \dots \\ kpi_m^{target} \end{bmatrix},$$

де KPI_m^{target} – цільове значення KPI після міграції.

Різнорідні KPI було приведено до порівнюваного вигляду за рахунок нормування та приведення до вигляду «більше-краще». Нормовані значення метрик $nKPI_j^{base}$ та $nKPI_j^{target}$ типу «більше-краще» та «менше-краще» обчислювалися відповідно:

$$nKPI_j^{base} = \frac{kpi_j^{base} - kpi_j^{min}}{kpi_j^{max} - kpi_j^{min}}, \quad (1)$$

$$nKPI_j^{base} = \frac{kpi_j^{max} - kpi_j^{base}}{kpi_j^{max} - kpi_j^{min}}, \quad (2)$$

$$nKPI_j^{target} = \frac{kpi_j^{target} - kpi_j^{min}}{kpi_j^{max} - kpi_j^{min}}, \quad (3)$$

$$nKPI_j^{target} = \frac{kpi_j^{max} - kpi_j^{target}}{kpi_j^{max} - kpi_j^{min}}, \quad (4)$$

де kpi_j^{min} – мінімальне значення опорного діапазону; $kpi_j^{\max}$ – максимальне значення опорного діапазону j-ї метрики, $j = 1 \dots m$, m – кількість метрик; $nKPI^{base}, nKPI^{target} \in [0,1]$.

Умови, за яких планувалася міграція, було описано вектором-стовпцем контекстних факторів C. Він відображав властивості середовища та системи, що модулювали ефект стратегії, але не розглядалися як керовані змінні вибору:

$$C = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_q \end{bmatrix},$$

де $context_q$ – q-й контекстний фактор;

q – загальна кількість контекстних факторів.

Множину альтернативних стратегій міграції S було задано дискретно:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\},$$

де n – загальна кількість стратегій.

Базовий ефект BE_{s_i} стратегії $s_i \in S$, $i = 1 \dots n$ визначався як вектор-стовпець:

$$BE_{s_i} = \begin{bmatrix} b_1^{s_i} \\ \dots \\ b_j^{s_i} \end{bmatrix},$$

де $b_j^{s_i}$ – j-й базовий показник KPI відповідної i-ї стратегії; $j = 1 \dots m$.

Контекстна поправка CE_{s_i} стратегії $s_i \in S$, $i = 1 \dots n$ визначалася як матриця розмірності $m \times q$:

$$CE_{s_i} = \begin{pmatrix} c_{11}^{s_i} & c_{12}^{s_i} & \dots & c_{1q}^{s_i} \\ c_{21}^{s_i} & c_{22}^{s_i} & \dots & c_{2q}^{s_i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1}^{s_i} & c_{m2}^{s_i} & \dots & c_{mq}^{s_i} \end{pmatrix},$$

де $c_{mq}^{s_i}$ – коефіцієнт впливу q-го контекстного фактору на контекстну поправку m-го нормованого KPI для i-ї стратегії, $c_{mq}^{s_i} \in [-1; 1]$.

Слід зазначити, що значення контекстної поправки в межах [-1,1] трактувалися наступним чином: конкретна контекстна поправка «послаблює» чи «підсилює» конкретний очікуваний ефект стратегії. Нульові значення трактувалися як відсутність помітного ефекту.

Ефект кожної стратегії $\Delta nKPI_{s_i}$ було подано вектором-стовпцем, як очікуваний зсув нормованих KPI:

$$\Delta nKPI_{s_i} = BE_{s_i} + CE_{s_i} \cdot C \quad (5)$$

У портфельній постановці або при розділенні системи на компоненти параметри BE і CE можуть задаватися окремо для кожної системи/компонента, тобто утворюється набір таких векторів і матриць.

Постміграційний профіль нормованих KPI для кожної стратегії $s_i \in S$ було прогнозовано як суму базового стану та очікуваного зсуву:

$$nKPI_{s_i}^{post} = nKPI^{base} + \Delta nKPI_{s_i}, \quad (6)$$

з додатковим обмеженням для уникнення від'ємних значень: $nKPI_{s_i}^{post} = \min\left(1, \max\left(0, nKPI_{s_i}^{post}\right)\right)$. Бізнес-пріоритети було формалізовано через вектор-стовпець ваг W, який задавав відносну критичність кожної метрики:

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix},$$

де w_n – n-та вага відповідної метрики; $n = 1 \dots m$; $w_n \geq 0$.

Для кількісної оцінки придатності стратегії $s_i \in S$ було використано штраф за недосягнення порогів – D_{s_i} як зважену суму дефіцитів, що виникали лише у разі, якщо прогнозоване значення було нижчим за цільове:

$$D_{s_i} = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot max\left(0, nKPI_j^{target} - nKPI_{s_i,j}^{post}\right), \quad (7)$$

Витрати на реалізацію стратегії $s_i \in S$ було враховано через нормовану оцінку MC_{s_i}, яка відображала відносну складність, трудомісткість і тривалість виконання міграції. Окремо варто зазначити, що компроміс між мінімізацією витрат міграції та досягненням KPI було задано параметром β, $\beta \in [0,1]$. Даний параметр інтерпретувався наступним чином: чим ближче значення параметру β до 0, тим більшу роль в фінальній оцінці грало досягнення цільових KPI. І навпаки, чим ближче параметр β до 0, тим більшу роль в фінальній оцінці грала мінімізація витрат/складності міграції. Таким чином, інтегральний бал T_{s_i} було визначено як:

$$T_{s_i} = \beta \cdot MC_{s_i} + (1-\beta) \cdot D_{s_i}, \quad (8)$$

Таким чином стратегію $s_i \in S$ було визначено як альтернативу з мінімальним інтегральним балом у заданому контексті. Таким чином забезпечувалося одночасне врахування якості сервісу за KPI та обмежень на витрати міграції, а також можливість пояснення вибору через внески окремих метрик у дефіцит.

$$s = arg\ min\ T_{s_i}, \quad (9)$$

за умови виконання обмежень:

$$\begin{cases} nKPI^{base} \in [0,1] \\ nKPI^{target} \in [0,1] \\ c_{mq}^{s_i} \in [-1;1] \\ w_n \geq 0 \\ \beta \in [0,1] \end{cases}$$

Апробація результатів дослідження. Необхідність вибору стратегії хмарної міграції було сформульовано як задачу порівняння трьох альтернативних підходів LS (Lift-and-Shift), PF (Re-platforming) та EN (Re-engineering) за очікуваним профілем ключових показників ефективності. Для системи було задано базові виміряні та мінімально прийнятні цільові значення KPI після міграції [11]. Опис вхідних KPI та опорних меж наведено в табл. 1. Опис цільових порогів за ключовими показниками ефективності системи було наведено у табл 2.

Таблиця 1 – Вхідні KPI, опорні межі нормування

Метрика	Напрям	kpi^{min}	kpi^{max}	kpi^{base}
Response time, мс	менше–краще	120	400	220
Throughput, транз/с	більше–краще	300	1200	600
Resource utilization rate, %	менше–краще	40	95	75
Total cost of ownership, USD/рік	менше–краще	300000	650000	480000
Availability, %	більше–краще	99.0	99.99	99.5
Time to market, дні	менше–краще	3	21	14
Scalability, коеф.	більше–краще	1.0	3.0	1.6

Таблиця 2 – Цільові пороги метрик

Метрика	kpi^{target}
Response time	170
Throughput	800
Resource utilization rate	70
Total cost of ownership	420000
Availability	99.7
Time to market	7
Scalability	2.2

Після цього було задано умови застосування стратегій. У таблиці 3 наведено контекстні фактори нормованій шкалі [0;1].

Таблиця 3 – Контекстні фактори

Фактор	Позначення	Значення
Критичність системи	context_crit	0.8
Варіативність навантаження (міра нестабільності робочого профілю)	context_var	0.6
Складність інтеграцій	context_int	0.7

У таблиці 4 наведено розрахунок $nKPI^{base}$ і $nKPI^{target}$ шляхом нормування значень з табл. 1 за (1)–(4), причому обидва типи метрик були приведені до інтерпретації «більше – краще».

Таблиця 4 – Нормовані значення KPI для базового та цільового станів

Метрика	$nKPI^{base}$	$nKPI^{target}$
Response time	0.642857	0.821429
Throughput	0.333333	0.555556
Resource utilization rate	0.363636	0.454545
Total cost of ownership	0.485714	0.657143
Availability	0.505051	0.707071
Time to market	0.388889	0.777778
Scalability	0.300000	0.600000

Було задано матриці контекстних поправок з коефіцієнтами $c_{crit}, c_{var}, c_{int}$ для кожної стратегії. Додатково було задано параметри MC_{s_i} і β. В межах прикладу матриці CE_{s_i} було спрощено до вигляду $(c_{crit}\ \ c_{var}\ \ c_{int})$, тоді величина $CE_{s_i} \cdot C$ була однаковою для всіх KPI в межах стратегії. Результат наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнти контекстної поправки та міграційна вартість

s_i	c_{crit}	c_{var}	c_{int}	$CE_{s_i} \cdot C$	MC_{s_i}	β
LS	-1	0.8	0.3	-0.11	0.2	0.3
PF	0.9	-0.8	-0.3	0.03	0.5	0.3
EN	0.9	-0.7	-0.2	0.16	0.9	0.3

Далі було розраховано BE_{s_i} для кожного KPI, тобто внесок стратегії без урахування контекстної поправки (табл. 6).

Таблиця 6 – Базовий ефект для нормованих KPI

Метрика	BE_{LS}	BE_{PF}	BE_{EN}
Response time	0.052314	0.193086	0.282429
Throughput	0.072156	0.312133	0.461000
Resource utilization rate	-0.037945	0.160618	0.324636
Total cost of ownership	0.102314	0.235943	0.303857
Availability	0.067105	0.231325	0.365040
Time to market	0.127711	0.312133	0.461000
Scalability	0.116600	0.328800	0.511000

Слід звернути увагу на від'ємне значення показника Resource utilization rate для BE_{LS}. Це цілком допустиме значення, що інтерпретувалося наступним чином: в середньому/типовому сценарії без контекстної поправки стратегія LS прогнозувалася як така, що погіршує цей KPI на нормованій шкалі.

Далі, використовуючи (5) та (6) було отримано повний прогнозований ефект та постміграційний профіль для кожної зі стратегій відповдіно. Результати розрахунків за формулами було наведено у таблиці 7.

Таблиця 7 – Зсуви $\Delta nKPI$ та прогнозовані $nKPI^{post}$ для стратегій

Метрика	$\Delta nKPI_{LS}$	$nKPI_{LS}^{post}$	$\Delta nKPI_{PF}$	$nKPI_{PF}^{post}$	$\Delta nKPI_{EN}$	$nKPI_{EN}^{post}$
Response time	-0.057686	0.585171	0.223086	0.865943	0.442429	1.000000
Throughput	-0.037844	0.295489	0.342133	0.675466	0.621000	0.954333
Resource utilization rate	-0.147945	0.215691	0.190618	0.554254	0.484636	0.848272
Total cost of ownership	-0.007686	0.478028	0.265943	0.751657	0.463857	0.949571
Availability	-0.042895	0.462156	0.261325	0.766376	0.525040	1.000000
Time to market	0.017711	0.406600	0.342133	0.731022	0.621000	1.000000
Scalability	0.006600	0.306600	0.358800	0.658800	0.671000	0.971000

Від'ємні значення $\Delta nKPI_{LS}$ означали, що для стратегії LS прогнозований постміграційний рівень нормованогоKPI зменшувався відносно базового стану, тобто це інтерпретувалося як погіршення показника.

Після цього було розраховано зважені внески та проміжні дефіцити для кожної зі стратегій. Тут за d_{s_i} позначено $\max\left(0, \text{nKPI}_{\text{j}}^{\text{target}} - \text{nKPI}_{\text{s}_{\text{i}},\text{j}}^{\text{post}}\right)$ з (7), тобто проміжні розрахунки. Результат наведено у таблиці 8.

Таблиця 8 –Зважені внески та дефіцити

Метрика	w_j	d_{LS}	$w \cdot d_{LS}$	d_{PF}	$w \cdot d_{PF}$	d_{EN}	$w \cdot d_{EN}$
Response time	0.20	0.236258	0.047252	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Throughput	0.15	0.260067	0.039010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Resource utilization rate	0.10	0.238854	0.023885	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Total cost of ownership	0.20	0.179115	0.035823	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Availability	0.25	0.244915	0.061229	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Time to market	0.05	0.371178	0.018559	0.046756	0.002338	0.000000	0.000000
Scalability	0.05	0.293400	0.014670	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

З Для кожної за стратегій було обчислено показник дефіциту за (7). Результати наведено в таблиці 9.

Таблиця 9 – Підсумкові значення дефіцитів за стратегіями

Стратегія s_i	D_{s_i}
LS	0.240428
PF	0.002338
EN	0.000000

Нарешті, для кожної зі стратегій було обчислено інтегральний бал за (8). Результати розрахунків наведено в таблиці 10.

Таблиця 10 – Інтегральна оцінка T_{s_i}

s_i	MC_{s_i}	$\beta \cdot MC_{s_i}$	$(1-\beta) \cdot D_{s_i}$	T_{s_i}
LS	0.2	0.060000	0.168299	0.228299
PF	0.5	0.150000	0.001636	0.151636
EN	0.9	0.270000	0.000000	0.270000

Згідно (9), цільова стратегія вибиралася як та, що має мінімальний інтегральний показник T_{s_i}. В даному випадку, $s = \arg\min T_{s_i} = PF$.

Таким чином, апробація показала, що модель забезпечувала відтворюваний вибір стратегії через формалізоване зіставлення альтернатив у просторі нормованих KPI та явне врахування контексту й вартості міграції. За заданих порогових вимог, ваг пріоритетів та параметра компромісу β = 3 мінімальне

значення T_{s_i} було отримано для стратегії PF, що відповідало найкращому балансу між досягненням цільового профілю KPI та витратами на реалізацію. Стратегія LS була оцінена як менш придатна через накопичення дефіцитів за критичними KPI, тоді як EN забезпечувала нульовий дефіцит, але поступалася через вищу умовну вартість міграції в обраній постановці. Отриманий результат продемонстрував, що модель придатно відокремлювала ефект стратегії від управлінського компромісу між якістю та витратами і могла використовуватися як консультативний інструмент для попереднього ранжування стратегій.

Обговорення результатів дослідження. За результатами дослідження було розроблено KPI-орієнтовану модель передміграційного вибору стратегії, яка прогнозувала постміграційний профіль нормованих показників ефективності на основі базового стану IC, очікуваного ефекту стратегії та контекстної поправки, а також формувала інтегральну оцінку альтернатив через поєднання штрафу за недосягнення цільових KPI, нормованої міграційної вартості з керованим параметром компромісу β та системи обмежень.

Апробацію розробленої моделі було виконано на прикладі, де задача вибору стратегії хмарної міграції формалізувалася як порівняння трьох альтернативних підходів LS, PF та EN за очікуваним профілем ключових показників ефективності. Вхідні дані містили базові значення KPI, опорні межі нормування та цільові пороги після міграції для заданого набору метрик. Умови, за яких планувалася міграція, було подано через контекстні фактори, що модулювали ефект стратегії, а порівняння альтернатив виконувалося у нормованому просторі KPI так, щоб «більше» завжди означало «краще» незалежно від первинного напряму метрики.

Отримані результати показали, що різні стратегії формували принципово відмінні постміграційні KPI-профілі навіть за однакових цільових порогів. Для LS приріст нормованих метрик виявився недостатнім, щоб досягти заданих порогів за критичними KPI: постміграційне значення для response time становило 0.585171 при цільовому 0.821429, для throughput – 0.295489 при цільовому 0.555556, для availability – 0.462156 при цільовому 0.707071, а для scalability – 0.306600 при цільовому 0.600000. Негативні зсуви $\Delta nKPI$ для LS у таблиці 6 означали, що після врахування контекстної поправки сумарний ефект стратегії зменшував нормовану «якість» відповідних KPI відносно базового стану. У практичній інтерпретації це могло відповідати ситуації, коли перенесення «as-is» не дає достатнього виграшу, а в умовах підвищеної критичності, варіативності навантаження та складних інтеграцій частина метрик схильна до потенційної деградації через накладні витрати або обмежену оптимізацію конфігурацій та ресурсів. Водночас PF формувала профіль, який практично повністю відповідав порогам: response time і досягав 0.865943, throughput – 0.675466, availability – 0.766376, а єдиний помітний «зазор» зберігався для time-to-market (0.731022 при пороговому 0.777778). Така картина могла бути типовим практичним очікуванням від PF, коли зміни обмежуються рівнем платформи та інфраструктурних механізмів і дають суттєве покращення продуктивності й надійності без повної перебудови прикладної логіки. В свою чергу, організаційно-зумовлені метрики, на кшталт time to market, значних покращень не отримали, оскільки в меншій мірі залежали від хмарної інфраструктури, як такої. Нарешті, EN забезпечувала найвищі значення нормованих KPI (зокрема 1.000000 для response time та 1.000000 для availability), що узгоджувалося з очікуваною перевагою глибшої переробки IC з позиції досягнення цільового стану. Поява значень 1.000000 означала, що прогнозований KPI досягав найкращого можливого рівня в рамках прийнятої шкали, що могло відповідати сценарію суттєвих архітектурних покращень.

Ці відмінності стали кількісно явними на рівні дефіцитів відносно порогів та їх зважених внесків. Значення дефіцитів у таблиці 7 фактично відображали «відстань» від прогнозованого стану до порогу в нормованій шкалі. Для LS дефіцити накопичувалися одразу за кількома метриками з високою значущістю, включно з availability (дефіцит 0.244915 за ваги 0.25) та response time (дефіцит 0.236258 за ваги 0.20), що формувало вагомі внески у штраф. Додатково суттєвими були дефіцити за throughput (0.260067 за ваги 0.15), resource utilization (0.238854 за ваги 0.10) і time-to-market (0.371178 за ваги 0.05). У підсумку це дало D_{LS} = 0.240428, тобто значний сукупний недобір вимог у нормованому просторі KPI. Для PF сумарний дефіцит практично зник і становив 0.002338, причому він був зумовлений виключно метрикою time-to-market (дефіцит 0.046756 за ваги 0.05), тоді як EN забезпечив нульовий дефіцит, тобто повне досягнення порогів за всіма метриками. У реалістичній інтерпретації такий розподіл внесків міг модулювати ситуацію, коли стратегія або «провалює» кілька критичних метрик одночасно (тоді штраф швидко зростає), або має один локальний недолік в менш пріоритетній метриці (тоді сумарний дефіцит майже нульовий).

Ключовим результатом апробації стало те, що рекомендація моделі визначилася не лише «якістю» за KPI, а керованим компромісом між досягненням цільового профілю та витратами на реалізацію стратегії через параметр β = 0.3. За умовної нормованої вартості MC_{LS} = 0.2, 0.5 для PF і 0.9 для EN інтегральний бал T набув значень 0.228299, 0.151636 та 0.270000 відповідно, тобто мінімум був отриманий для PF. Отже, модель відтворювано обрала PF як стратегію з найкращим балансом між мінімізацією дефіцитів KPI та обмеженнями на ресурси міграції, тоді як LS програла через накопичені дефіцити, а EN – через завищену «вартісну» складову за заданого β.

Порівняно з дослідженнями [1], [3], [6], [9], запропонована модель мала перевагу в тому, що зводила передміграційне рішення до прозорої й відтворюваної процедури зі зрозумілою логікою пояснення результату через внесок окремих KPI у дефіцит і через явний параметр компромісу β. На відміну від підходів, де вибір стратегії часто лишається наслідком інструментальної оцінки або провайдерно-специфічного планування ([4]. [6], [10]), тут стратегія обиралася як мінімум інтегрального критерію в нормованому просторі метрик, що підвищувало переносимість моделі між організаціями та середовищами за умови коректного задання опорних меж нормування і порогів. Процедура також не вимагала дорогих серій експериментів або повного економічного моделювання на ранньому етапі (у порівнянні з [2]). Для первинного ранжування були достатні базові KPI, цільові пороги, ваги пріоритетів і узагальнена оцінка міграційної вартості, що відповідало задачі зменшення ресурсних витрат планування при збереженні формалізації.

Разом із тим апробація виявила й недоліки, що можуть бути пов'язані з математичними припущеннями та характером даних. По-перше, параметри ефектів стратегій, контекстної чутливості та вартості міграції у такій постановці задавалися умовно, тому зовнішня валідність висновків була обмеженою. По-друге, контекстна поправка для спрощення була прийнята однаковою для всіх KPI всередині стратегії, що знижувало реалістичність, адже на практиці контекст по-різному впливає на доступність, TCO та time-to-market.

У підсумку апробація підтвердила працездатність моделі як консультативного інструмента для раннього, пояснюваного ранжування стратегій у заданому контексті та продемонструвала, що вибір стратегії може бути обґрунтовано через поєднання дефіцитів KPI відносно порогів і обмежень на ресурси міграції. Одночасно було окреслено необхідність подальшої калібрації параметрів на емпіричних даних і розширення моделі, щоб зменшити залежність від умовних оцінок і підвищити прикладну достовірність рекомендацій.

Висновки.

1. Було розроблено модель вибору стратегії хмарної міграції на основі профілю KPI, де різнорідні метрики було приведено до нормованого простору так, щоб після перетворення більше значення відповідало кращому стану незалежно від первинного напряму метрики. Ефект кожної стратегії було формалізовано як очікуваний зсув нормованих KPI, що складався з базового ефекту та контекстної поправки, а відповідність цільовим вимогам оцінювалася через дефіцит метрик відносно порогів із зважуванням за вектором бізнес-пріоритетів W. Витратну складову було введено через нормовану оцінку MC, а компроміс між мінімізацією витрат і досягненням KPI було задано параметром β. Інтегральний критерій T визначено як комбінацію MC і D, після чого рекомендовану стратегію задавали як альтернативу з мінімальним T у заданому контексті.

2. Було виконано апробацію моделі на прикладі порівняння стратегій LS, PF та EN за заданими базовими KPI, опорними межами нормування й пороговими цільовими значеннями, а також контекстними факторами, що модулювали ефект стратегії у просторі нормованих KPI. У результаті було отримано постміграційні нормовані KPI-профілі для кожної стратегії та розраховано дефіцити відносно порогів і підсумкові значення D, які становили 0.240428 для LS, 0.002338для PF та 0.000000 для EN. За β=0.30 інтегральна оцінка T склала 0.228299 (LS), 0.151636 (PF) та 0.270000 (EN), тому модель відтворювано визначила PF (Re-platforming) як найкращий компроміс між досягненням цільового профілю KPI та витратами на реалізацію, тоді як LS поступалася через накопичення дефіцитів, а EN – через вищу умовну вартість міграції.

Список літератури

1. Ramchand K., Baruwal Chhetri M., Kowalczyk R. Enterprise adoption of cloud computing with application portfolio profiling and application portfolio assessment. *Journal of Cloud Computing*. 2021. Т. 10, № 1. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00210-w (дата звернення: 21.01.2026).
2. Henning S., Hasselbring W. A configurable method for benchmarking scalability of cloud-native applications. *Empirical Software Engineering.* 2022. Т. 27, № 6. https://doi.org/10.1007/s10664-022-10162-1 (дата звернення: 21.01.2026).
3. Hosseini Shirvani M., Amin G. R., Babaeikiadehi S. A decision framework for cloud migration: A hybrid approach. *IET Software*. 2022. https://doi.org/10.1049/sfw2.12072 (дата звернення: 21.01.2026).
4. An efficient model to estimate and optimise the cloud migration costs from on-premises web apps / V. Prakash та ін. *Discov Computing*. 2025. Т. 28, № 151. https://doi.org/10.1007/s10791-025-09666-3 (дата звернення: 21.01.2026).
5. Michael Ayas H., Leitner P., Hebig R. An empirical study of the systemic and technical migration towards microservices. *Empirical Software Engineering*. 2023. Т. 28, № 4. https://doi.org/10.1007/s10664-023-10308-9 (дата звернення: 21.01.2026).
6. Harikrishna M., Srinivasa R. T., Gopikrishna Y. Optimizing cloud migration: designing robust architectures for seamless transition from on-premises to azure for sap and database systems. *International Journal of Engineering Technology Research & Management (IJETRM).* 2025. Т. 09, № 01. https://doi.org/10.5281/zenodo.14782256 (дата звернення: 21.01.2026).
7. Migration-Based Load Balance of Virtual Machine Servers in Cloud Computing by Load Prediction Using Genetic-Based Methods / L.-H. Hung та ін. *IEEE Access.* 2021. Т. 9. С. 49760–49773. https://doi.org/10.1109/access.2021.3065170 (дата звернення: 21.01.2026).
8. Continuous integration of architectural performance models with parametric dependencies – the CIPM approach / M. Mazkatli та ін. *Automated Software Engineering.* 2025. Т. 32, № 2. https://doi.org/10.1007/s10515-025-00521-9 (дата звернення: 21.01.2026).
9. Şener U., Gökalp E., Eren P. E. CLOUD-QM: a quality model for benchmarking cloud-based enterprise information systems. *Software Quality Journal*. 2024. https://doi.org/10.1007/s11219-024-09669-1 (дата звернення: 21.01.2026).
10. Fine-Grained Performance and Cost Modeling and Optimization for FaaS Applications / C. Lin та ін. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems.* 2022. С. 1–

15. https://doi.org/10.1109/tpds.2022.3214783 (дата звернення: 21.01.2026).
11. Євланов М. В., Шутько В. В. Ключові показники ефективності інформаційної системи для хмарної міграції. *Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2025) : Матеріали міжнар. наук. конф.*, м. Харків, 4 груд. 2025 р. 2025. https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2025/12/91-Ievlanov_Shutko_Sektsiia-2.pdf (дата звернення: 22.01.2026).

References (transliterated)

1. Ramchand K., Baruwal Chhetri M., Kowalczyk R. Enterprise adoption of cloud computing with application portfolio profiling and application portfolio assessment. *Journal of Cloud Computing*. 2021. Т. 10, № 1. https://doi.org/10.1186/s13677-020-00210-w (accessed: 21.01.2026).
2. Henning S., Hasselbring W. A configurable method for benchmarking scalability of cloud-native applications. *Empirical Software Engineering*. 2022. Т. 27, № 6. https://doi.org/10.1007/s10664-022-10162-1 (accessed: 21.01.2026).
3. Hosseini Shirvani M., Amin G. R., Babaeikiadehi S. A decision framework for cloud migration: A hybrid approach. *IET Software*. 2022. https://doi.org/10.1049/sfw2.12072 (accessed: 21.01.2026).
4. An efficient model to estimate and optimise the cloud migration costs from on-premises web apps / V. Prakash et al. *Discov Computing*. 2025. Т. 28, № 151. https://doi.org/10.1007/s10791-025-09666-3 (accessed: 21.01.2026).
5. Michael Ayas H., Leitner P., Hebig R. An empirical study of the systemic and technical migration towards microservices. *Empirical Software Engineering*. 2023. Т. 28, № 4. https://doi.org/10.1007/s10664-023-10308-9 (accessed: 21.01.2026).
6. Harikrishna M., Srinivasa R. T., Gopikrishna Y. Optimizing cloud migration: designing robust architectures for seamless transition from on-premises to azure for sap and database systems. International *Journal of Engineering Technology Research & Management (IJETRM)*. 2025. Т. 09, № 01. https://doi.org/10.5281/zenodo.14782256 (accessed: 21.01.2026).
7. Migration-Based Load Balance of Virtual Machine Servers in Cloud Computing by Load Prediction Using Genetic-Based Methods / L.-H. Hung та ін. *IEEE Access*. 2021. Т. 9. P. 49760–49773. https://doi.org/10.1109/access.2021.3065170 (accessed: 21.01.2026).
8. Continuous integration of architectural performance models with parametric dependencies – the CIPM approach / M. Mazkatli та ін. *Automated Software Engineering*. 2025. Т. 32, № 2. https://doi.org/10.1007/s10515-025-00521-9 (accessed: 21.01.2026).
9. Şener U., Gökalp E., Eren P. E. CLOUD-QM: a quality model for benchmarking cloud-based enterprise information systems. *Software Quality Journal*. 2024. https://doi.org/10.1007/s11219-024-09669-1 (accessed: 21.01.2026).
10. Fine-Grained Performance and Cost Modeling and Optimization for FaaS Applications / C. Lin та ін. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2022. P. 1–15. https://doi.org/10.1109/tpds.2022.3214783 (accessed: 21.01.2026).
11. Yevlanov M. V., Shut'ko V. V. Kliuchovi pokaznyky efektyvnosti informatsiynoyi systemy dlya khmarnoyi mihratsiyi [Key performance indicators of an information system for cloud migration]. *Informatsiyno-komunikatsiyni tekhnolohiyi ta kiberbezpeka (IKTK-2025): materialy mizhnar. nauk. konf.* [Information and Communication Technologies and Cybersecurity (ICTC-2025): Proc. of the Int. Sci. Conf.], Kharkiv, 4 December 2025. 2025. Available at: https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2025/12/91-Ievlanov_Shutko_Sektsiia-2.pdf (accessed: 22.01.2026).

Надійшла (received) 24.01. 2026

Відомості про авторів / About the Authors

Євланов Максим Вікторович (Ievlanov Maksym) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; email: maksym.ievlanov@nure.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6703-5166.

Шутько Віктор Валерійович (Shutko Viktor) – аспірант кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; email: viktor.shutko@nure.ua, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0527-4401.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

УДК 005.8:658.012.32 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.7

В. М. КУХАРСЬКИЙ, С.Д.БУШУЄВ

УПРАВЛІННЯ ЧЕРЕЗ ПРОЄКТИ ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА СТРАТЕГІЧНОГО РОЗВИТКУ ОСВІТНЬО-НАУКОВИХ УСТАНОВ УКРАЇНИ

Трансформація системи вищої освіти України в умовах євроінтеграції, децентралізації публічного управління та воєнних викликів потребує переходу від адміністративно-ієрархічних моделей до адаптивних, результатоорієнтованих форм врядування. Метою статті є обґрунтування концепції управління через проєкти (governance by projects) як методологічної основи стратегічного розвитку освітньо-наукових установ України. Методологічну основу дослідження становлять теорія врядування, концепції проєктного та портфельного управління, підходи інтерактивного й адаптивного врядування, а також методи системного аналізу, бібліометричного огляду та формалізованого моделювання. Проаналізовано еволюцію університетських моделей управління в Європейському просторі вищої освіти та визначено інституційні чинники переходу до проєктно-орієнтованих форм реалізації стратегій. Розкрито зовнішній і внутрішній виміри проєктного врядування, у межах яких проєкти розглядаються як базові одиниці реалізації стратегічних цілей, а портфель проєктів — як інструмент узгодження ресурсів, пріоритетів і очікуваних результатів. Узагальнено підходи провідних міжнародних моделей управління проєктами та показано значення поєднання контрактних, реляційних і державних механізмів врядування для забезпечення стратегічної узгодженості та інституційної стійкості університетів. Наукова новизна полягає в розробленні математичної моделі адаптивного проєктного врядування, яка формалізує взаємозв'язки між стратегічними цілями розвитку, портфелем проєктів, ресурсними обмеженнями, ризиками та показниками результативності. Запропонована модель забезпечує кількісну оцінку управлінських рішень, підтримує сценарне планування, механізми «stop / review / scale» та підвищує обґрунтованість стратегічного вибору в умовах невизначеності. Практичне значення результатів полягає у можливості використання моделі для побудови системи стратегічного управління закладами вищої освіти України в період трансформацій і післявоєнного відновлення.

Ключові слова: управління через проєкти; проєктне врядування; стратегічний розвиток університетів; адаптивне управління; чутливе управління; портфельне управління; інституційна автономія; математична модель стратегічного управління; вища освіта України.

V. KUKHARSKYY, S. BUSHUYEV

GOVERNECE BY PROJECTS AS A METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR THE STRATEGIC DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC INSTITUTIONS IN UKRAINE

The transformation of Ukraine's higher education system under conditions of European integration, decentralization of public governance, and wartime challenges necessitates a shift from administrative–hierarchical models toward adaptive, results-oriented forms of governance. The purpose of this article is to substantiate the concept of governance by projects as a methodological foundation for the strategic development of educational and scientific institutions in Ukraine. The methodological framework of the study is based on governance theory, project and portfolio management concepts, and approaches to interactive and adaptive governance, combined with methods of systems analysis, bibliometric review, and formalized modeling. The evolution of university governance models within the European Higher Education Area is analyzed, and institutional drivers of the transition toward project-oriented forms of strategy implementation are identified.The external and internal dimensions of project governance are examined, within which projects are conceptualized as the basic units of strategic goal implementation, while project portfolios serve as instruments for aligning resources, priorities, and expected outcomes. The study synthesizes approaches from leading international project management frameworks and demonstrates the importance of integrating contractual, relational, and governmental governance mechanisms to ensure strategic coherence and institutional resilience of universities.The scientific novelty of the research lies in the development of a mathematical model of adaptive project governance that formalizes the relationships among strategic development objectives, project portfolios, resource constraints, risks, and performance indicators. The proposed model enables quantitative evaluation of managerial decisions, supports scenario-based planning, operationalizes "stop / review / scale" decision mechanisms, and enhances the robustness of strategic choice under conditions of uncertainty. The practical significance of the results consists in the applicability of the model for designing strategic management systems in Ukrainian higher education institutions during periods of systemic transformation and post-war recovery.

Keywords: governance by projects; project governance; strategic development; adaptive governance.

Вступ. Українська система вищої освіти протягом останнього десятиліття демонструє поступовий перехід від централізованої адміністративної моделі до децентралізованої, стратегічно орієнтованої системи врядування, що відповідає європейським стандартам. Ця трансформація зумовлена як внутрішніми потребами модернізації, так і зовнішніми імперативами євроінтеграції, зокрема участю України у Болонському процесі та розбудовою Європейського простору вищої освіти (ЕНЕА). Розвиток нових управлінських практик характеризується поступовим упровадженням принципів, притаманних європейському простору вищої освіти. Зокрема, розширюється автономія університетів: академічна, організаційна, фінансова та кадрова. Паралельно впроваджується цифрове управління, що включає електронний документообіг, онлайн-вступ, онлайн акредитацію освітніх програм та інші інструменти електронної взаємодії. Посилюється роль механізмів прозорості та підзвітності, зокрема через діяльність Національного агентства із забезпечення якості вищої освіти, що впроваджує європейські стандарти якості (ESG 2015) [1-9].

Період 2020–2025 років позначився формуванням ключових засад нової управлінської парадигми, у межах якої розвиваються інститути стратегічного планування, індивідуальних освітніх траєкторій [10] та Національної рамки кваліфікацій. Ці інструменти спрямовані на забезпечення якості освіти, прозорості управлінських процесів і узгодження освітньої політики з потребами ринку праці. Водночас процес

© В. М. Кухарський, С.Д. Бушуєв, 2026

модернізації супроводжується низкою системних викликів – фінансовою нестабільністю закладів освіти, різним рівнем цифровізації закладів, регіонів, фрагментацією управлінських структур та наслідками повномасштабної війни, що призвела до руйнування інфраструктури, переміщення студентів і викладачів, втрати частини людського капіталу.

У межах цього процесу формується нова модель управління вищою освітою, що поєднує принципи проєктного управління, цифрового врядування та гнучкого стратегічного планування. Вона враховує кілька взаємопов'язаних тенденцій:

- персоналізацію освітніх траєкторій, що передбачає формування індивідуальних навчальних планів, модульних курсів і міждисциплінарних програм;
- упровадження мікрокваліфікацій (micro-credentials), сумісних із європейською системою Europass та Європейською рамкою кваліфікацій (EQF), для визнання коротких циклів навчання й перекваліфікації;
- інтеграцію штучного інтелекту (AI-based guidance) у процеси супроводу студентів, профілювання компетенцій та цифрового моніторингу результатів навчання;
- розбудову цифрової інфраструктури управління ЗВО, що забезпечує взаємодію адміністративних, навчальних і дослідницьких процесів через електронні сервіси, хмарні платформи та відкриті дані.

Важливим контекстом цих змін є децентралізаційна реформа, яка значною мірою визначила архітектуру управління публічним сектором в Україні. Передача частини повноважень і ресурсів на місцевий рівень посилила інституційну спроможність громад і стала чинником управлінської стійкості в умовах війни. Такий підхід сприяв підвищенню ефективності прийняття рішень, прозорості та залученню громадянського суспільства до процесів управління.

Університети, особливо регіональні, дедалі частіше виступають центрами регіонального розвитку, соціальної згуртованості та інноваційної активності, діючи у партнерстві з органами місцевого самоврядування, бізнесом і міжнародними програмами технічної допомоги. Це розширює роль закладів вищої освіти як елементів системи місцевого врядування та створює передумови для впровадження проєктно-програмного управління. У цій моделі університети не лише виконують навчальні функції, а й реалізують стратегічні ініціативи з розвитку територій від проєктів післявоєнного відновлення до формування регіональних кластерів знань, підтриманих Європейським Союзом.

Таким чином, еволюція управління у вищій освіті України відбувається у межах складної взаємодії трьох системних факторів:

- європеїзації управлінських практик, що визначає стандарти автономії, підзвітності та прозорості [11-15];
- децентралізації влади, яка формує простір для регіональної ініціативи та університетської самостійності [16];
- воєнної трансформації, що виступає каталізатором інституційної стійкості й стратегічної адаптації сектору освіти.

З управлінської точки зору, ці тенденції свідчать про перехід від адміністративного управління до адаптивного, проектно орієнтованого врядування, у якому університети розглядаються як відкриті системи - суб'єкти стратегічного розвитку, здатні самостійно формувати програми, управляти ризиками та залучати ресурси через європейські та світові грантові платформи .

Сучасне управління перестає бути адміністративною процедурою контролю, натомість розглядається як політичний і соціальний проект, у межах якого актори спільно створюють політику через партнерства, спільні ініціативи й мережеві форми взаємодії. Управління набуває характеристик динамічного процесу, що постійно відтворюється через практику спільного управління, обміну даними та розподілу відповідальності [17-20].

У цій парадигмі університет розглядається як активний суб'єкт публічної політики, що бере участь у спільному виробленні рішень, реалізації державних і регіональних стратегій, забезпеченні стійкості та інноваційності суспільного розвитку. Такий підхід створює умови для формування цілісної системи проектно-програмного управління, яка є актуальною для освітнього сектору України у період трансформацій.

У цьому контексті дедалі більшої популярності набуває управлінська модель, яку в науковому дискурсі окреслюють як «управління через проєкти» або governance by projects. Хоча термін не завжди фігурує як усталене поняття, його сутність реалізується під різними назвами – проєктне управління (project governance), проєтизація (projectification) [21], проєкно-орієнтоване управління (project-based governance), управління через проєкти (governance through projects). Це свідчить не лише про широку інтерпретацію, а й про концептуальну єдність ідеї: використання проєктного підходу як механізму стратегічного управління, що передбачає свідоме конструювання правил, ролей, процедур і портфельних рішень, через які організація спрямовує свою діяльність і досягає визначених цілей.

Бібліометричні огляди свідчать, що поняття project governance сформувалося на стику загальної теорії врядування – зокрема транзакційної економіки, теорії агентських відносин та корпоративного управління – і практик проєктного менеджменту. Ця концепція виникла як відповідь на потребу в управлінських механізмах, здатних забезпечити стратегічну узгодженість, ефективність реалізації та прозорість процесів у складних організаційних середовищах. Водночас термін залишався концептуально неоднозначним, що зумовило появу різних підходів до його інституціоналізації – від

нормативно-орієнтованих моделей до адаптивних практик, залежно від контексту застосування.

Університети, які інтегрують цю логіку, демонструють перехід від управління процесами до формування портфелів стратегічних ініціатив, що охоплюють освітні, наукові, інфраструктурні та соціальні напрями. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ефективність реалізації цілей, а й забезпечити гнучкість у реагуванні на зовнішні виклики, зберігаючи при цьому академічну автономію.

Для України, яка перебуває у фазі глибокої трансформації освітнього сектору, модель управління через проєкти відкриває перспективи побудови гнучкої, результатоорієнтованої системи управління, здатної поєднувати стратегічне бачення з інституційною самостійністю. Така система може стати ефективним інструментом реалізації державних і європейських пріоритетів у сфері вищої освіти, зокрема в контексті євроінтеграції, цифровізації, забезпечення якості та розвитку людського капіталу.

Аналіз останніх досліджень. Концепції проектного управління як інструмент управління реформами. У цьому контексті важливо враховувати існування двох відносно автономних напрямів концептуалізації проєктного управління. Перший розглядає управління проєктами як зовнішній процес щодо конкретного проєкту – інструмент корпоративного контролю портфеля та узгодження зі стратегічними цілями організації. Другий – як внутрішній процес, що охоплює механізми узгодження цілей, координації дій та розподілу відповідальності між учасниками тимчасової міжорганізаційної коаліції. Важливо підкреслити, що ці два виміри не суперечать один одному. Навпаки, вони репрезентують різні рівні мета-керування проєктністю – зовнішній (інституційний) і внутрішній (операційний), які у взаємодії формують цілісну архітектуру стратегічного управління в умовах сучасного університету.

В одному випадку університет як «власник портфеля» встановлює принципи, за якими ініціюються, відбираються, пріоритезуються й контролюються проєкти трансформації (цифровізація навчання, дослідницька інфраструктура, інтернаціоналізація, енергоефективність тощо). В іншому – кожен великий проєкт (наприклад, міжуніверситетська мережа, центр компетентностей чи публічно-приватне партнерство) потребує свого режиму врядування: ролей і відповідальностей, правил узгодження з регуляторним середовищем, прозорих процедур розподілу ризиків і вигод, і механізмів взаємного контролю між партнерами. Така двошарова архітектура пояснює, чому в практиці з'являється різна термінологія («управління через проєкти», «управління проєктами як об'єктами врядування», «портфельне управління») – але в усіх випадках ядром є проєкт як одиниця управлінської дії.

Ця дихотомія, описана авторами [22], пояснює різноманіття термінів – управління через проєкти проти проектне управління – але не заперечує їхньої спільної сутності: проєкт виступає як носій управлінського рішення та одиниця реалізації стратегій. У роботі Ахоли та інших представлено результати вибірки 1501 статтей з ключовим словом "governance" і, дотримуючись стандартних процедур бібліометрії, виокремлено 16 найцитованіших джерел (≥20 цитувань), автори трактують їх як головні «main origins of governance», що задають каркас для подальших інтерпретацій у проектному контексті. У цих джерелах домінують агентська логіка та корпоративне врядування, а загалом вони відбивають міждисциплінарний характер теорій врядування, від економіки та фінансів до права, політології й соціології. Саме на цей фундамент спирається подальше розрізнення «зовнішнього» і «внутрішнього» вимірів врядування проєктів, через які проектний підхід перетворюється на практичну архітектуру управління.

Проєктне управління аналізується як двокомпонентна система: з одного боку, як зовнішнє управління, що здійснюється на рівні організації або держави, а з іншого – як внутрішнє управління, що формується в межах конкретного проєкту (рис. 1).

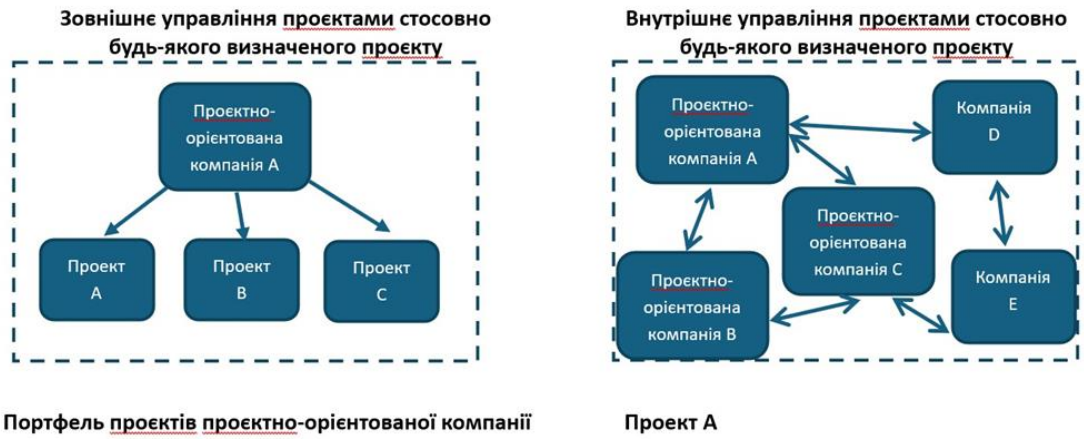

Рис. 1. Напрямки досліджень в галузі управління проектами

У цьому кейсі розрізнення двох вимірів управління проєктів демонструє, як проєктний підхід одночасно працює на рівні портфеля і на рівні конкретної міжорганізаційної ініціативи. У «зовнішній» логіці проєкти підпорядковані власнику портфеля (університету), який задає стандарти ролей, звітності, моніторингу та узгоджує їх із місією й стратегією; таким чином розв'язується типова для цієї перспективи задача впорядкування множини проєктів із коротко- і довгостроковими цілями організації та запобігання агентським відхиленням на рівні окремих команд.

У своїй «внутрішній» логіці проект діє як тимчасовий організаційний та транзакційний центр між юридично незалежними учасниками; основним завданням є розробка спільних правил та процедур для координації, контролю та захисту, гармонізації інтересів та синхронізації взаємозалежної роботи – з вибором механізмів залежно від контексту та поведінки партнерів.

Комбінування цих вимірів концептуально фіксує подвійність проєктного управління: з одного боку, портфельні рішення і стандарти «спускаються» зверху, з іншого – кожний великий проєкт набуває суб'єктності та формує «правила гри» всередині міжорганізаційної мережі.

Для закладів вищої освіти це означає необхідність поєднання централізованих принципів відбору/пріоритезації та прозорої підзвітності на рівні портфеля з гнучкими, контекстуальними формами взаємодії в кожному проекті трансформації (цифровізація навчання, реконструкція інфраструктури, міжвузівські консорціуми). Така дворівнева архітектура забезпечує інституційну спроможність управляти ризиками, забезпечувати стратегічну узгодженість та спільно створювати цінність в умовах високої невизначеності та багатосторонньої зацікавленості, що є характерними для українського сектору вищої освіти.

«Проектизація публічної діяльності» є багаторівневим явищем із суперечливими наслідками: на особистому рівні – зміни в часовій структурі роботи, формування нових професійних ідентичностей та «орієнтованого на проєкти» способу мислення; на організаційному рівні – проникнення логіки проєктів у постійні структури, парадокс контролю (підвищення рівня підзвітності та процедур в обмін на обіцянки гнучкості), залежність від грантових режимів та пов'язана з цим інноваційна неоднозначність; на суспільному рівні – використання проектів як інструменту політики, що одночасно стимулює розвиток і створює ризики фрагментації, «тимчасовості» рішень та невідповідності між логікою проекту та логікою оцінки суспільних результатів. Саме ці три рівні стають аналітичною рамкою для синтезу емпіричних імплікацій у виявлених джерелах.

Університетське середовище добре вписується в цю структуру. На індивідуальному рівні проєктний режим стимулює формування нових особистісних якостей та компетенцій, але збільшує тиск термінів та звітності за грантами; на інституційному рівні інтеграція проектів у поточні процеси супроводжується «парадоксом контролю», коли обіцянки гнучкості поєднуються з більш складними правилами та аудитами; на політичному рівні грантові інструменти прискорюють інновації, але водночас створюють ризик збереження тимчасового характеру рішень та розриву між проектами та стратегією університету.

Для українських ЗВО висновок практичний: щоб перетворити управління через проєкти (governance by projects) із множини роз'єднаних ініціатив на архітектуру управління, необхідно одночасно: інституціоналізувати управління портфелем (визначення пріоритетів, механізми прийняття рішень, узгодження з місією та ключовими показниками ефективності, інтеграція результатів у поточні процеси) та встановити внутрішній режим управління для кожного великого проекту, який синхронізує інтереси партнерів, правила підзвітності та оцінки з реалістичними термінами змін. Саме поєднання цих двох рівнів мінімізує системні ризики проектної діяльності (фрагментація, «тиранія термінів», «замкнення» проекту без масштабування) і водночас дозволяє нам скористатися її перевагами – цільовою мобілізацією ресурсів, прискореним тестуванням рішень та прозорістю підзвітності.

Отже, інтеграція теоретичних підходів дозволяє розглядати governance by projects не лише як інструмент управління реформами, а як нову парадигму освітнього врядування, що базується на принципах:

1. Системність – проєктне управління є складовою ширшої системи державного і корпоративного врядування.
2. Адаптивність – управління має реагувати на динамічні зміни зовнішнього середовища.
3. Плюралізм – поєднання формальних і неформальних механізмів забезпечує стійкість системи.
4. Ціннісна орієнтація – акцент на суспільній користі, інклюзії та сталому розвитку.
5. Дані й аналітика – як основа для прийняття рішень у стилі data-driven governance.

Для українських закладів вищої освіти актуальність підходу «управління на основі проектів» визначається трьома обставинами. По-перше, в умовах війни університети працюють в умовах високої невизначеності та численних транзакцій із зовнішніми партнерами; управління проектами забезпечує необхідні механізми для захисту, координації та адаптації до контексту. По-друге, логіка портфеля дозволяє прозоро розставити пріоритети обмежених ресурсів серед конкуруючих ініціатив (відновлення інфраструктури, цифрова трансформація, інтернаціоналізація, підтримка досліджень), пов'язуючи кожен проект із місією університету та ключовими показниками ефективності. По-третє, інтерактивний характер сучасних викликів для університетів (співпраця з

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

громадами, бізнесом, роботодавцями) вимагає саме тих інструментів метауправління, які описані в літературі: правила участі, процедури спільного прийняття рішень, механізми підзвітності та арбітражу конфліктів – і все це найкраще реалізується на рівні конкретних проектів та програм. Таким чином, незалежно від терміна – «управління проектами», «проектне управління» або «управління через проекти» – ми говоримо про інституціоналізацію проекту як базового модуля управління, що поєднує стратегію, ресурси та багатосторонню взаємодію в ефективну систему управління університетом.

У 2012 році на Всесвітньому конгресі з управління проєктами було запропоновано піраміду управління проєктами, яка враховувала ефекти від проєкту [23]. Пізніше у дослідженнях Мюллера (Müller) та інших авторів починаючи з 2016 [24] наголошувалося, що традиційне розуміння успіху проєкту, засноване на критеріях «час–бюджет–якість», є недостатнім у сучасних умовах. Замість цього акцент зміщується на створення цінності, тобто на здатність проєкту генерувати результати, які сприяють досягненню стратегічних цілей організації. Такий підхід є особливо релевантним для закладів вищої освіти, де проєкти – наприклад, запуск нових освітніх програм, цифровізація процесів чи міжнародна акредитація – мають не лише операційне, а й стратегічне значення. Водночас, за даними Інституту проектного менеджменту (PMI, 2014) та міжнародної мережі незалежних фірм, що надають аудиторські, податкові та консультаційні послуги KPMG (2010), лише 40% проєктів узгоджені з бізнес-стратегією організацій, що свідчить про наявність системної проблеми, яка може бути критичною для ЗВО.

Автори дослідження пропонують розглядати проєктне управління як частину ширшої системи управління змінами, що охоплює портфелі, програми та окремі проєкти. Вони порівнюють три провідні концепції до управління проєктами – PMI, Асоціації проектного менеджменту (APM) та концепції запропонованої Мюллером. Ці моделі формують основу сучасного розуміння проєктного управління як інструменту реалізації організаційної стратегії, і кожна з них пропонує власну логіку побудови управлінських рівнів та узгодження між ними.

Підхід PMI базується на концепції Організаційного проектного менеджменту (Organizational Project Management, OPM), яка включає управління портфелем, програмами та окремими проєктами як складові єдиної системи реалізації стратегічних цілей. Управління проєктами тут розглядається як інституційно інтегрований процес, що забезпечує стратегічну узгодженість через чітко визначені функції, ролі та процеси. Цей підхід є особливо релевантним для організацій, які прагнуть системної побудови управлінської вертикалі – від корпоративного рівня до рівня окремого проєкту.

Концепція APM, натомість, акцентує на управлінні проектним менеджментом (Governance of Project Management, GoPM), що передбачає зовнішнє управління проєктами з боку організації. У цій моделі ключовою є роль спонсора проєкту як агента стратегічного узгодження, а управління проєктами виконує функцію контролю та забезпечення відповідності стратегічним пріоритетам. Підхід APM орієнтований на прозорість, відповідальність і ефективність реалізації проєктів, що особливо важливо в умовах нормативного регулювання та державного фінансування, характерного для закладів вищої освіти.

Підхід запропонований Мюллером та іншими авторами пропонує гнучкіше бачення, де проєкти розглядаються як тимчасові організації, що функціонують у межах корпоративного управління. Важливою концептуальною складовою є поняття governmentality – спосіб, у який управлінці формують свою легітимність і вплив, забезпечуючи узгодження між рівнями управління не через формальні механізми, а через створення умов для саморегуляції. Цей підхід визнає контекстуальну специфіку організацій і допускає варіативність моделей управління залежно від типу проєкту, що робить його особливо цінним для ЗВО з високим рівнем автономії та складною інституційною структурою.

Автори демонструють, що попри відмінності у термінології та структурі, всі моделі визнають необхідність узгодження проектного управління з корпоративною стратегією, а також важливість ролі спонсора проекту та контекстуальних чинників організації. Ця позиція дозволяє чітко розмежувати рівні управління та забезпечити логічну інтеграцію між ними. Візуалізація, представлена у вигляді рисунка «Views of Governance in the Realm of Projects» (рис. 2), ілюструє, як кожна з моделей структурує управління на різних рівнях – від корпоративного до рівня окремого проєкту.

Спільним знаменником трьох підходів є вимога стратегічного вирівнювання проєктного управління з цілями організації, чіткий зв'язок між корпоративним (організаційним) і проєктним врядуванням, критична роль спонсора та чутливість режимів врядування до контексту інституції.

Відмінності – концептуальні. У PMI-парадигмі ключовою є ієрархія рівнів із власними визначеннями: OPM-governance як рамка, що спрямовує портфель/програму/проєкт; далі окремі рамки для портфеля, програми і проєкту, усі – як інструменти досягнення стратегічних та операційних цілей.

Натомість APM акцентує «Governance of Project Management» (GoPM): врядується не лише кожен рівень, а сама функція ПМ (мандат спонсора, стандарти ролей, підзвітність), що посилює зв'язок між корпоративним наглядом і практиками ПМ.

У лінії Müller вирішальним є вимір governmentality – яким чином «центр» проявляє себе на кожному рівні та через які етичні й поведінкові очікування забезпечується зв'язність між рівнями; це розширює «governance of projects» до наскрізної

рамки, що працює не тільки правилами, а й практиками взаємодії.

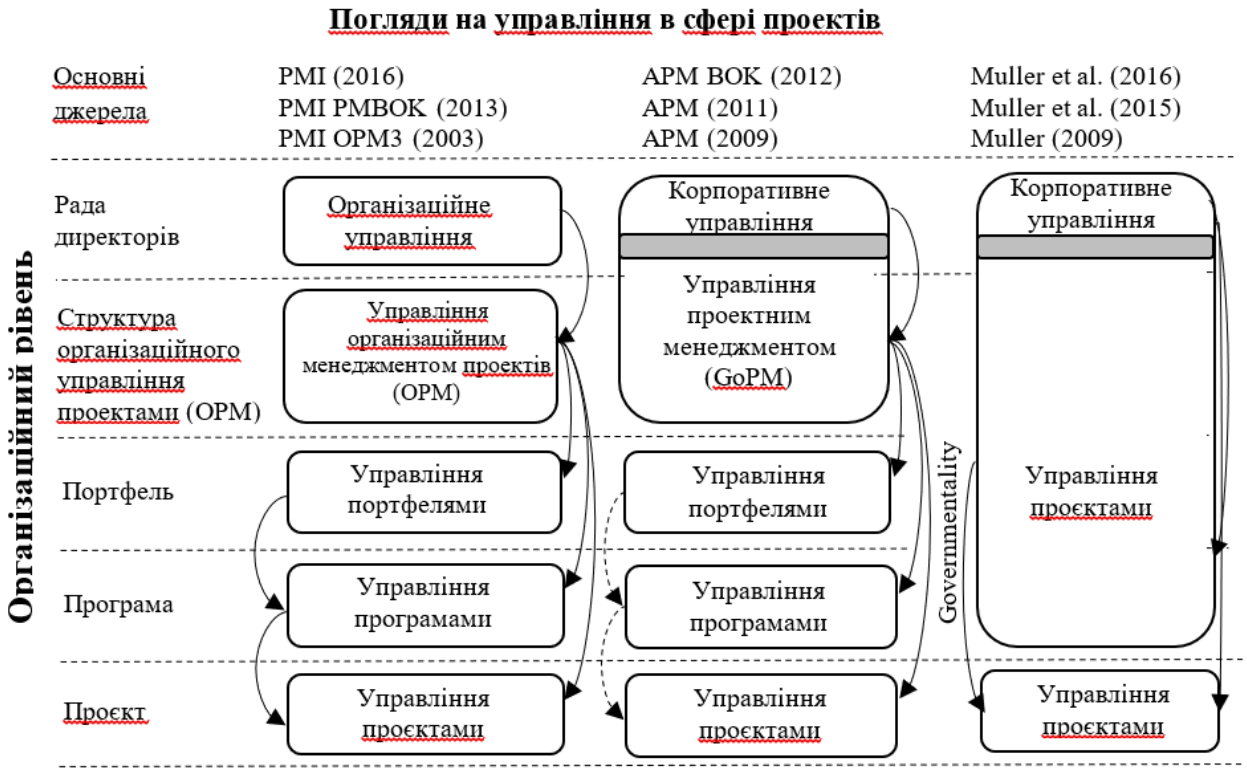

Рис. 2. Погляди на управління в сфері проєктів [24]

Додатково Musawir і співавтори [25-26] зіставляють цю типологію з дихотомією зовнішнього/внутрішнього врядування проєктів: перше – унідирекційні контролі з боку організації (агентська логіка, у т.ч. APM-GoPM), друге – спільні механізми координації/контролю/захисту всередині конкретного проєкту (логіка транзакційних витрат) для узгодження багатьох учасників. Це пояснює розщеплення термінів у літературі й підказує, що цілісна архітектура потребує обох перспектив.

Концептуальна рамка, запропонована Musawir et al., передбачає розширення ролі проєктного управління за межі життєвого циклу проєкту – до етапу utilization, коли результати починають приносити користь. Це особливо важливо для освітніх установ, де ефекти проєктів можуть проявлятися через роки після їх завершення. Автори також приділяють увагу поняттю benefits realization – досягненню результатів, які мають стратегічну цінність для стейкхолдерів. У контексті ЗВО це може означати підвищення якості освіти, розширення доступу, покращення репутації, залучення міжнародних партнерів тощо.

Цей порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок про те, що ефективне проектне управління не може розглядатися ізольовано, а має бути інтегрованим у загальну систему стратегічного управління організацією. Це означає необхідність формування багаторівневої моделі управління проектами, яка враховує специфіку освітнього середовища, стратегічні пріоритети ЗВО та потребу в прозорих механізмах реалізації змін.

У дослідженні Беккера та Стейна [27] запропоновано формалізовану дефініцію проєктного управління як системи правил, протоколів, структур і відносин, що забезпечують прийняття рішень у межах проєкту з метою досягнення стратегічної мети. Автори виходять із того, що багаторічні зусилля з удосконалення контролю й моніторингу не усувають системних причин провалів; отже, потрібен рівень «над управлінням» – правила, ролі та відносини, у межах яких узагалі ухвалюються рішення в проєкті. Формалізоване визначення «project governance», отримане методом Дельфі та верифіковане кейсами, описує його як «набір управлінських систем, правил, протоколів, відносин і структур, що створюють рамку, в межах якої ухвалюються рішення щодо розроблення та реалізації проєкту з огляду на бізнесову або стратегічну мотивацію».

Ключові результати цього дослідження: управління проектами має узгоджуватися з корпоративним управлінням, бути переважно загальним з можливістю контекстуальних коригувань, а контроль має бути лише частиною управління, що заздалегідь встановлює «правила гри». Автори розробили концептуальну рамку управління проєктами (Project Governance Framework), яка базується на принципах корпоративного управління, адаптованих до тимчасової природи проєктів (рис. 3).

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

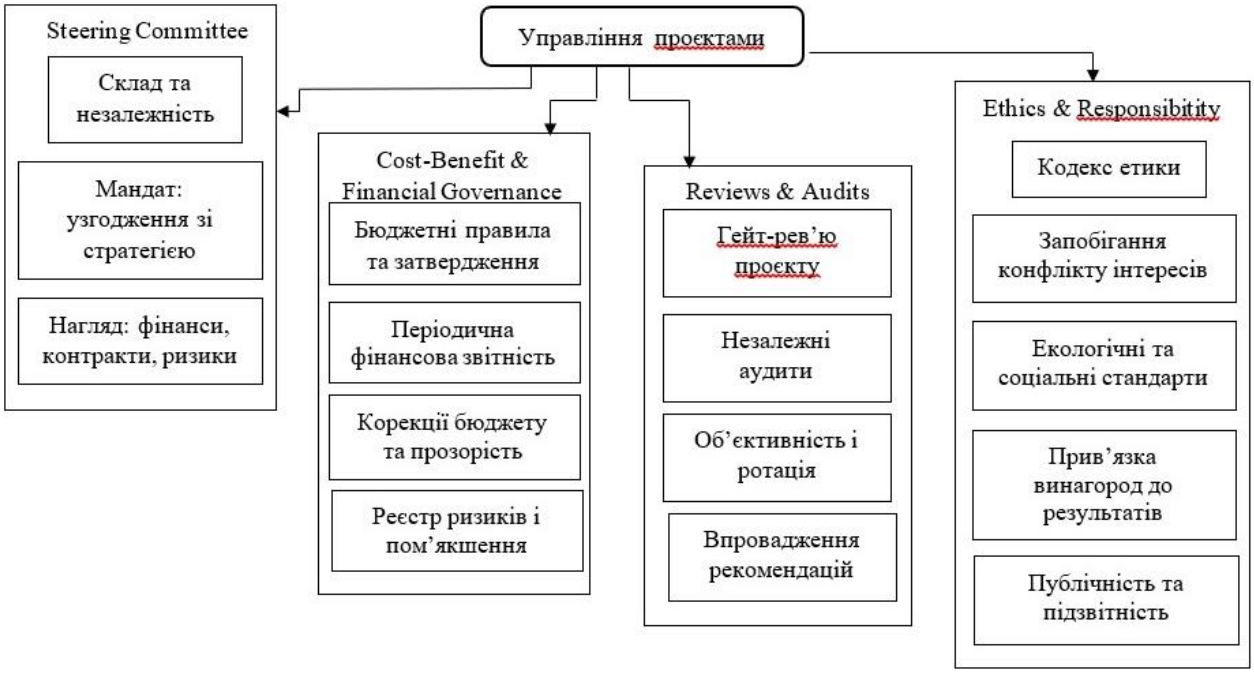

Рис. 3. Концептуальна рамка управління проєктами [27]

Рамка зводить зміст до чотирьох взаємопов'язаних кластерів: склад і робота керівного комітету (включно з компетентностями на стику фінансів, контрактування, аналізу ризиків та узгодженністю зі стратегією), управління витратами та вигодами (з регулярною фінансовою звітністю, прозорістю корекцій бюджетування та процесного ризик-менеджменту), проєктні рев'ю та аудити (з забезпеченням об'єктивності і ротації, розширеним мандатом на зовнішній аудит), етикою та відповідальністю, врегулювання конфліктів інтересів (з запровадженням етичного кодексу, запобіганню конфліктів інтересів, прив'язкою винагороди до результатів, врахування стандартів з охорони довкілля й соціальної відповідальності). Сукупно це переводить управління через проекти із рівня гасла на перевірений контрольний список для прийняття рішень та підзвітності.

Емпіричні спостереження за реальними кейсами уточнюють пріоритети рамки. По-перше, склад і спроможність керівного комітету (Steering Committee) виявляються «вузлом причинності» як успіхів, так і провалів: саме здатність структурувати фінанси та контракти, утримувати стратегічне узгодження та режим ризик-менеджменту напряму корелює з результатом. По-друге, системне дотримання етичного кодексу, соціальних і екологічних стандартів зменшує імовірність «повзучих» витрат і репутаційних ризиків; навпаки, їх брак часто лежить у корені негативних наслідків. По-третє, навіть у відносно успішних мегапроєктах більшість вимог рамки реалізовувались завдяки високій майстерності топ-менеджерів, а не через формально задану інфраструктуру врядування – отже, наявність формалізованої рамки економить час на узгодження «очевидного» й підвищує відтворюваність якості управлінських рішень.

З погляду теорії проєктного управління цей підхід уточнює межі між контролем і врядуванням: контроль – це операційна функція вимірювання/корекції в межах проєкту, тоді як врядування визначає, хто і за якими правилами ухвалює рішення, як розподіляються повноваження й відповідальність, які критерії «достатності» інформації для прийняття рішень, як забезпечуються незалежний аудит і прозорість. У термінах управління через проекти це і є інституціоналізація проєкту як базового модуля управління, що з'єднує стратегію, ресурси, ризики та стейкголдерську відповідальність у послідовну архітектуру.

Для закладів вищої освіти, особливо в українському контексті, модель Беккера і Стейна є корисною тим, що її чотирикутник можна перетворити на ініціативи з трансформації університетів. Роль керівного комітету природно бере на себе інституційна рада/проєктний комітет із залученням незалежних експертів і представників зовнішніх стейкголдерів (громади, донори, бізнес); блок «cost–benefit» задає прозорі правила для бюджетів, корекцій і «журналі» ризиків; модуль аудитів закріплює незалежні рев'ю і публічність; етичний кодекс інституалізує політики академічної доброчесності, недопущення конфлікту інтересів, екологічних і соціальних критеріїв. У поєднанні з портфельною логікою це забезпечує як «зовнішній» вимір – узгодження проєктів із місією та KPI університету, так і «внутрішній» – спільно погоджені правила гри всередині міжорганізаційних консорціумів (ERASMUS+, спільні лабораторії, програми відновлення).

Водночас підхід має межі застосовності, які доцільно врахувати в академічному середовищі. Потрібна локальна адаптація до публічно-правового статусу ЗВО та, наприклад, українських правових норм публічних фінансів і державних закупівель. Ці нормативні обмеження не нівелюють цінності рамки, а підказують шлях адаптації: зберігаючи її чотири опорні кластери: слід уточнити склад керівного комітету з урахуванням автономії факультетів та участі зовнішніх партнерів; переформатувати «фінансовий» блок у логіку багато-джерельного фінансування з грантами/донорськими коштами; підсилити акценти на прозорості прийняття рішень, академічній етиці й відкритих даних про прогрес/результати. Саме така адаптація дозволяє перетворити підхід Бейкера та Стейна на робочу архітектуру «управління через проєкти» у вищій освіті України.

У дослідженнях Луо та інших [28] представлена концептуальна модель, яка є важливим доповненням до теорії управління через проєкти, оскільки вона враховує не лише формальні механізми (контракти, регулювання), а й неформальні (довіру, культуру) та політичні (роль держави) (рис. 4). Автори пропонують тривимірну модель проєктного управління, яка включає три типи механізмів: контрактне управління, реляційне управління та урядове управління. При оцінці стратегій розвитку вищих навчальних закладів така багатовимірна структура дозволяє проводити емпіричні дослідження впливу взаємодії цих механізмів на ефективність управління та успішну реалізацію освітніх трансформацій.

Рис. 4. Теоретична модель управління мегапроектами та ефективність управління [28]

У цій моделі врядування мегапроєктів виділено три взаємопов'язані механізми – контрактне (CG), реляційне (RG) та державне (GG) – і показано їхній вплив на ефективність управління (governance performance), яку вимірюють за п'ятьма індикаторами: розумний та ефективний нагляд (GP1), точність і своєчасність ухвалення рішень (GP2), рівність відносин (GP3), дієвість стимулів (GP4) і задоволеність співпрацею (GP5).

У складі механізмів виділено два підкласи контрактного врядування – «розподіл ризиків» (RS) та «розподіл доходів/винагород» (RD) – два підкласи реляційного врядування – «підтримання відносин» (RM) і «культурний розвиток» (CD) – та два підкласи державного врядування – «регулювання» (GR) і «координація» (GC).

Гіпотези прямої дії фіксують вплив кожного механізму на результативність врядування (H1–H4), а блок опосередкувань (H5–H10) формалізує «плюралісність» врядування: державне може діяти через контрактне (GG→CG→GP) і через реляційне (GG→RG→GP); контрактне – через державне (CG→GG→GP) і через реляційне (CG→RG→GP); реляційне – через державне (RG→GG→GP) і через контрактне (RG→CG→GP). Сукупно це означає, що формальні стимули та регуляції перетворюються на узгоджену поведінку команд

У контексті «управління через проєкти» для ЗВО така схема задає практичну логіку налаштування двох рівнів: портфельного врядування (де «державне» – це регуляції МОН, донорів, акредитацій; «контрактне» – грантові угоди, внутрішні положення; «реляційне» – партнерства та консорціуми) і внутрішнього врядування кожного великого проєкту. Пріоритет – не ізольовано «посилювати контроль», а збалансувати й зв'язати три механізми так, щоб прямі ефекти CG, RG, GG і їхні медіації працювали на GP1–GP5: нагляд і своєчасні рішення, справедливі відносини, дієві стимули та задоволеність співпрацею.

Особливо цінним є включення до моделі компонента урядового управління, який раніше часто ігнорувався в теорії проєктного управління. В умовах формування стратегічного розвитку ЗВО, де держава є ключовим гравцем – як регулятор, фінансист і політичний ініціатор – ця складова є критично важливою. Урядове управління охоплює як регуляторні функції (нагляд, контроль, політики), так і координаційні (взаємодія між інституціями,

вирішення конфліктів, забезпечення ресурсів), що особливо актуально для освітніх мегапроєктів – наприклад, реформування системи акредитації, цифровізація, або створення міжуніверситетських кластерів.

Модель також демонструє, що ефективність управління залежить не лише від формальних контрактних механізмів, а й від неформальних – таких як довіра, комунікація, спільна культура. Це підтверджує, що стратегічні зміни в ЗВО не можуть бути реалізовані виключно через нормативні акти чи фінансування – потрібна взаємодія, партнерство, спільне бачення між учасниками освітнього процесу.

Паралельно з цим, у межах парадигми інтерактивного управління, яку розвивають Торфінг (Torfing) та інші [29], проєктний підхід розглядається як інструмент мобілізації ресурсів, ідей та акторів для вирішення складних соціальних проблем. Автори визначають інтерактивне управління як процес взаємодії множинних акторів з різними інтересами задля формулювання та досягнення спільних цілей. У цьому контексті проєкти виступають як платформи для співпраці, експериментування та створення публічної цінності, що особливо актуально для сфери освіти, де традиційні ієрархічні моделі управління часто виявляються неефективними.

Цей підхід висуває на перший план процесність, децентрованість і постійну комунікацію та погодження, а також ставить питання «метаврядування» – тобто як саме керувати такими мережевими процесами: які функції «вищого порядку» має виконувати держава/керівництво організації, які інструменти легітимації, підзвітності та арбітражу мають діяти. Для університетів, особливо в Україні, де реалізація реформ часто відбувається в багатостейкголдерних зв'язках (МОН, місцеві громади, донори, бізнес, громадянське суспільство), інтерактивне врядування природно поєднується з управлінням через проєкти: проєкти стають «місцем» спільного творення публічної цінності, а правила метаврядування – гарантом якості процесу й результатів.

Адаптивне проектне врядування як методологічна основа стратегічного управління діяльністю ЗВО. Беручи до уваги зростаючу багаторівневість управління у вищій освіті – перетин державної політики, інституційних стратегій, очікувань стейкхолдерів і зовнішніх викликів – дедалі очевиднішою стає обмеженість підходів, що спираються переважно на директивне планування й централізований контроль. Сучасні університети працюють у середовищі, де правила гри й часові горизонти змінюються швидше, ніж тривають стандартні цикли планування; у таких умовах ефективність визначається не стільки ідеальністю початкового плану, скільки спроможністю системи швидко коригувати курс на основі нових даних і колективного навчання. Це вимагає моделей управління, які «вбудовано» враховують мінливість контексту і здатні підтримувати керовану адаптацію: стислий такт ухвалення рішень, чітко окреслені портфельні «ворота» з прозорими критеріями проходження, ясний розподіл повноважень між рівнями, а також стабільні канали даних, що живлять замкнені петлі зворотного зв'язку між стратегією, портфелем, програмами й проєктами.

У цій логіці «управління через проєкти» переходить від статичної до динамічної конфігурації. Ідеї Thiry та Deguire щодо еволюційної природи стратегії [30] й Dewulf та Garvin щодо responsive governance [31] акцентують: траєкторії реформ часто є «emergent», тобто такими, що визначаються непередбачуваними зсувами середовища та взаємодією акторів, а не тільки первинним планом. Відтак центром тяжіння стає не довершеність методології планування, а спроможність системи організувати кероване експериментування і навчання «на ходу». У практичному вимірі це означає делегування рішень ближче до джерел інформації; запуск проєктів як «безпечних для помилки» ініціатив із чіткими критеріями зупинки, перегляду або масштабування; підтримку цих циклів цифровими системами моніторингу, які забезпечують оперативну видимість прогресу, навантаження, ризиків і ефектів для бенефіціарів; а також організацію регулярних стратегічних рев'ю, де керівні органи не лише контролюють відповідність плану, а й санкціонують необхідні відхилення на основі даних і зміни зовнішнього контексту.

Концепція responsive governance (конкретизує, як саме поєднати формальні та поведінкові механізми, щоб така адаптація була не хаотичною, а керованою. На рівні портфеля та програм це означає, що контрактні інструменти – регламенти, угоди про фінансування, внутрішні положення про проєктну діяльність – задають прозорі правила стимулювання та підзвітності, тоді як реляційні механізми – довіра, спільне розв'язання проблем, настанови до обміну знаннями – перетворюють ці правила на узгоджену поведінку команд і партнерів. Орієнтація лише на формальну відповідність графікам і планам є недостатньою, оскільки реальні проєкти еволюціонують: виникають нові залежності, змінюються ризики, з'являються альтернативні шляхи досягнення цілей. Ефективне управління в таких умовах вимагає керованих «вікон перегляду» припущень, здатності переосмислювати рішення в реальному часі, інституційованих практик післядії (after-action review) та залучення компетентних учасників до швидких, але легітимних змін у конфігурації робіт, бюджетів і ризиків. Такий підхід узгоджується з принципами Project Management 2.0, які передбачають децентралізацію, участь, адаптивність і стратегічну чутливість до змін.

З позицій теорії складних адаптивних систем описаної Duit та Galaz [32] адаптивне проєктне врядування у вищій освіті можна описати як поєднання трьох взаємопов'язаних контурів: стратегічного (визначає місію, обмеження і правила

«гри»), портфельного (відбирає та пріоритезує ініціативи, запускає експерименти й інтегрує їхні результати у постійні процеси) та операційного (організовує цикли навчання в командах і партнерствах). Кожен контур має власні рішення, але всі вони з'єднані даними, ритмами огляду та узгодженими ролями. У такій конфігурації зберігається стратегічна цілеспрямованість, але виконання стає гнучким і «чутливим» до контексту; саме це і підвищує резилієнтність університетів, дозволяючи їм забезпечувати якість та безперервність освітніх і наукових процесів попри невизначеність і часті зовнішні збурення.

Для українських ЗВО, які реалізують стратегічні ініціативи в умовах високої турбулентності, це означає необхідність переходу до управлінських моделей, здатних поєднувати чіткість стратегічного бачення з гнучкістю реалізації. Responsive governance у цьому випадку може слугувати основою для побудови стійкої системи управління освітніми трансформаціями, яка враховує змінність середовища, багаторівневу взаємодію та потребу в адаптивних рішеннях.

Дослідники також наголошують на плюралістичному характері governance, який вимагає поєднання формальних і неформальних механізмів прийняття рішень. Klakegg та інші [33] як і Brunet та Aubry [34-35] вказують, що надмірна стандартизація процедур може обмежувати інноваційність, особливо у складних і креативних проектах, таких як освітні реформи. Тому ефективне проектне врядування має ґрунтуватися на балансі між контролем і автономією, поєднуючи структурні інструменти (регламенти, звітність) із неформальними практиками (мережеві домовленості, інституційна довіра).

Ефективність проєктного підходу як методологічної основи стратегічного управління діяльністю ЗВО значною мірою залежить від інституційного середовища, в якому функціонує заклад. Стратегічне управління не є ізольованим процесом – воно формується на перетині нормативно-правових рамок, управлінських традицій, політичних очікувань та організаційної культури. Саме тому аналіз інституційного контексту є ключовим для розуміння потенціалу та обмежень стратегічного розвитку ЗВО.

У межах цього дослідження стратегічне управління розглядається як багаторівнева система, що охоплює інституційне поле, організаційні структури та індивідуальні практики. Такий підхід дозволяє виявити, як зовнішні чинники (державна політика, ринок освітніх послуг, міжнародні стандарти) взаємодіють із внутрішніми процесами (стратегічне планування, управлінські рішення, участь персоналу) та формують траєкторії розвитку університету.

Аналіз сучасної літератури підтверджує актуальність цього підходу. Зокрема, у дослідженні Fumasoli та Hladchenko [36] стратегічне управління вищою освітою розглядається як динамічний процес, що відбувається на трьох аналітичних рівнях: системному, організаційному та індивідуальному. На системному рівні стратегія пов'язана з позиціонуванням університету в полі вищої освіти, конкуренцією між закладами, міжнародною інтеграцією та політикою якості. На організаційному – з розробкою стратегічних планів, використанням інструментів управління (SWOT, Balanced Scorecard), а також з реакцією на зовнішні виклики (фінансування, пандемія, цифровізація). На індивідуальному – з участю середніх менеджерів, академічного персоналу та адміністративних працівників у формуванні та реалізації стратегій.

Особливої уваги заслуговує теза про те, що стратегічне управління є ефективним лише за умови врахування внутрішньої складності організації. Університети часто демонструють зовнішню узгодженість у стратегічних документах, але насправді мають високий рівень внутрішньої різноманітності, що впливає на реалізацію стратегічних цілей. Це підтверджує необхідність гнучких управлінських моделей, здатних адаптуватися до багаторівневих викликів.

Математична модель стратегічного управління ЗВО в парадигмі governance by projects.

Беззаперечно, що ідеєю моделі оптимального управління ЗВО має бути стратегія як динамічна «траєкторія», а не статичний стан. Вона має реалізовуватися через портфель проєктів, керований вікнами перегляду (after-action review), цифровим моніторингом, правилами масштабування і постійним узгодженням з місією та KPI. Тому природньою стає математична рамка моделі як динамічної системи керування портфелем проєктів [37-38]. Змінними моделі мають бути стратегічні стани (що «рухаємо»).

Нехай $x_t \in \mathrm{R}^n$ вектор стратегічних спроможностей/результатів ЗВО на момент t наприклад: інтернаціоналізація, цифрова зрілість, дослідницька інфраструктура, енергоефективність тощо.

Нехай $s_t \in \mathrm{R}^n$ цільова траєкторія стратегії (desired targets), яка може уточнюватися після рев'ю (бо стратегія еволюційна)

Нехай $u_{i,t} \geq 0$ – ресурси, виділені на проєкт i у період t. Проєкти – «одиниці реалізації стратегії», узгоджені з місією та KPI університету.

Додатково вводимо бінарне рішення «воріт»: $g_{i,t} \in \{0,1\}$, що формалізує «критерії зупинки, перегляду, масштабування чи продовження.

Нехай w_t випадкові зміни контексту (регуляторні, фінансові, воєнні, партнерські), бо «реальні проєкти еволюціонують» і змінюються ризики.

У такому випадку динаміка стратегічного розвитку через портфель проєктів може описуватися рівнянням переходу станів (як портфель змінює університет)

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

$$x_{t+1} = x_t + \sum_{i=1}^{m} g_{i,t} A_i \phi_i(u_{i,t}) - d(x_t, w_t) + \varepsilon_t ,$$

$A_i \in \mathrm{R}^{n\times 1}$ – «профіль внеску» проєкту i у стратегічні спроможності (наприклад, проєкт цифровізації піднімає компоненту «digital maturity»).

$\phi_i(\,)$ – функція віддачі від ресурсів (зазвичай спадна гранична віддача): $\phi_i(u\,) = \log(1+u)$ або $\sqrt{u}$.

$d(x_t, w_t)$ – «зношування/втрати/відволікання» (операційне навантаження, ризики, кризи).

ε_t – шум.

Це математично відображає тезу: портфельне врядування впорядковує множину ініціатив і узгоджує зі стратегією, але потрібна адаптивність до змін.

Варто також враховувати обмеження щодо ресурсів (реальні бюджети)

$$\sum_{i=1}^{m} u_{i,t} \le B_t, \quad u_{i,t} \ge 0$$

де B_t – доступний бюджет/ресурсний ліміт у період

t включно з багатоджерельним фінансуванням, як потрібна адаптація рамки.

Цільовими функціями стратегічного управління (що оптимізуємо) будуть мінімізація «стратегічного розриву», витрат та ризиків:

$$\min_{\{u_{i,t}, g_{i,t}\}} \sum_{t=0}^{T} [\underbrace{\|x_t - s_t\|^2 \mathrm{w}}_{\text{відхилення від стратегічних цілей}}$$

$$\min_{\{u_{i,t}, g_{i,t}\}} \underbrace{\lambda \sum_i u_{i,t}}_{\text{витрати/навантаження}}$$

$$\min_{\{u_{i,t}, g_{i,t}\}} \underbrace{\rho R_t(u,g,w)]}_{\text{ризик}}$$

Матриця w задає пріоритети (що важливіше – цифровізація чи інтернаціоналізація тощо).

R_t може включати ризики «фрагментації», «тиранії термінів», «замкнення проєкту без масштабування» – які тут прямо вказані як системні ризики портфельної діяльності.

Керовані «вікна перегляду», зміни конфігурації робіт/бюджетів на основі даних можна розглядати як оновлення стратегії після рев'ю (адаптивна траєкторія) та формалізувати так:

на кожному рев'ю (наприклад, кожні K періодів) оновлюємо цілі:

$$s_{t+} = s_t + \Gamma\left(y_t - y_t^{\text{expected}}\right)$$

де: y_t – вимірювані результати (KPI, навчальні результати, навантаження, ризики).

Γ – «швидкість навчання» (наскільки гнучко ЗВО змінює стратегію).

Це відповідає тезі: рев'ю не лише контролює план, а санкціонує необхідні відхилення на основі даних і контексту.

Нехай $M_{i,t}$ – цифрові метрики проєкту (прогрес, ризики, ефект для бенефіціарів, тоді правила "stop / review / scale" як порогових політик можуть задаватися

$$g_{i,t} = \begin{cases} 0, & M_{i,t} \le \tau_{\text{stop}} \\ 1, & M_{i,t} \ge \tau_{\text{continue}} \end{cases},$$

а «scale» реалізується як різке збільшення $u_{i,t}$ при $M_{i,t} \ge \tau_{\text{scale}}$

Прив'язуючись до типових сьогоднішніх практик українських ЗВО вектор стратегічного стану ЗВО можна описати вибравши десять ключових вимірів:

Персоналізація освітніх траєкторій

KPI:

- % студентів з індивідуальними навчальними планами;
- середня кількість вибіркових/міждисциплінарних модулів на студента;
- показники утримання (retention) / своєчасного завершення.

Дослідницька інфраструктура та продуктивність

KPI:

- обсяг грантових надходжень/рік;
- публікації/цитування (нормовані показники) або кількість статей Q1–Q2;
- кількість/завантаженість ключового обладнання, лабораторій (utilization).

Цифровізація навчання

KPI (приклади):

- частка дисциплін у LMS (%);
- частка курсів з цифровими активностями/оцінюванням (%);
- середня активність студентів у LMS (логіни/тиждень, завершення завдань).

Цифрова інфраструктура управління та відкриті дані

KPI:

- частка адміністративних процесів, що виконуються е-сервісами (%);
- % ключових реєстрів/даних, доступних через інтегровані системи;
- індекс «відкритості даних» (наявність/оновлення наборів, API/дашборди).

Мікрокваліфікації та короткі цикли навчання

KPI:

- кількість мікрокваліфікацій/рік;
- кількість слухачів (внутрішніх + зовнішніх);
- частка мікрокваліфікацій, що визнаються/перезараховуються (%):
- AI-супровід і цифровий моніторинг результатів навчання:
- наявність AI-based guidance у ключових точках (вступ/вибір траєкторії/ризик відрахування) (0/1 або шкала зрілості):
- точність моделей ризику/рекомендацій (AUC/precision, якщо є):
- частка студентів, охоплених моніторингом результатів (%).

Інтернаціоналізація

KPI:

- кількість міжнародних партнерств/угод (активних);
- мобільність: incoming/outgoing (студенти/викладачі);
- частка програм з компонентом англійською/подвійних дипломів (%).

Зрілість стратегічного управління портфелем проєктів (Strategic Portfolio Maturity)

KPI:

- % проєктів у портфелі, прив'язаних до стратегічних KPI (coverage);
- частота стратегічних рев'ю/перепріоритезацій (на рік);
- частка проєктів, що проходять "ворота" stop/review/scale за даними (governance discipline).

Мережеві структури та "кластери" (міжуніверситетські коаліції)

KPI:

- кількість активних консорціумів/кластерів;
- кількість спільних програм/лабораторій/центрів;
- обсяг ресурсів, залучених через партнерства (фінанси/обладнання/послуги).

Енергоефективність та стійкість інфраструктури

KPI:

- споживання енергії на м² (кВт·год/м²);
- частка модернізованих будівель/тепломодернізації (% площ);
- витрати на енергію на студента (або на м²).

Висновки. Сучасна модель управління вищою освітою в Україні формується як гібридна євроінтеграційна система, де інституційна автономія поєднується з державним стратегічним координуванням і міжнародним партнерством. Вона водночас спрямована на відновлення людського потенціалу у воєнних умовах та структурну інтеграцію у спільний європейський освітній простір, що відповідає принципам Болонського процесу і підходам програмного управління розвитком сектору.

Еволюція університетського врядування в Європі свідчить про поступову трансформацію управлінської парадигми – від державного контролю до гібридних форм, у яких університети діють як автономні, але взаємопов'язані актори у складній системі публічного управління. Ця динаміка не означає ослаблення ролі держави, а радше її трансформацію від адміністратора до стратегічного координатора. Університети дедалі більше працюють в умовах, де автономія формально закріплена, але реальні механізми управління реалізуються через контракти, дані, аналітику та проектні програми.

Проєктний підхід до управління дозволяє реалізовувати реформи через конкретні ініціативи – наприклад, фандрайзинг, цифровізацію освітнього процесу, модернізацію інфраструктури, впровадження комерційно орієнтованих мікрокредитних програм, нових освітніх програм з дуальною формою навчання. З іншого – забезпечує можливість залучення зовнішніх ресурсів, партнерів та експертів, що є критично важливим в умовах обмеженого державного фінансування та високої конкуренції. Такий підхід сприяє підвищенню прозорості та підзвітності, що відповідає вимогам європейських стандартів управління в освіті.

Українська реформа управління ЗВО може спиратись на гібридні підходи: поєднувати державні гарантії і стратегічний контроль із інституційною автономією та участю зовнішніх стейкхолдерів через наглядові ради. Для України, яка перебуває в умовах війни, європейської інтеграції та масштабних освітніх реформ, така логіка управління є не лише доцільною, а й необхідною. Вона дозволяє поєднати системність державного регулювання з гнучкістю автономних рішень університетів, забезпечуючи баланс між стратегічними пріоритетами та локальними ініціативами. Перехід до управління через проєкти створює інституційні передумови для формування стійкої освітньої екосистеми, де управління змінами відбувається не через директиви, а через реалізацію узгоджених проектів і програм, заснованих на принципах партнерства, даних та результативності.

Список літератури

1. National Erasmus+ Office, HERE Team. *Overview of the key reforms and priorities in higher education of Ukraine*. Kyiv: Erasmus+ Programme of the European Union, 2024. URL: https://erasmusplus.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/neo_heres_ukrainian-higher-education-reforms_2024-1.pdf
2. Eurydice. *National reforms in higher education – Ukraine*. Brussels: European Commission, EACEA, 2025. URL: https://eurydice.eacea.ec.europa.eu/eurypedia/ukraine/national-reforms-higher-education
3. Україна. Кабінет Міністрів України. Про реалізацію експериментального проєкту щодо надання державних грантів на здобуття вищої освіти: постанова Кабінету Міністрів України від 18.07.2024 № 822. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-realizatsiiu-eksperymentalnoho-proektu-shchodo-nadannia-derzhavnykh-hrantiv-na-zdobuttia-vyshchoi-osvity-i180724-822
4. Україна. Кабінет Міністрів України. Про схвалення Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2022–2032 роки: розпорядження Кабінету Міністрів України від 23.02.2022 № 286-р. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-rozvitku-vishchoyi-osviti-v-ukrayini-na-20222032-roki-286-
5. Міністерство освіти і науки України. *Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2022–2032 роки*. Київ, 2022. URL: https://mon.gov.ua/osvita-2/vishcha-osvita-ta-osvita-doroslikh/strategiya-rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-na-2022-2032-roki
6. Міністерство освіти і науки України. *Освіта 4.0: український світанок*. Київ, 2022. URL: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/news/2022/12/10/Osvita-4.0.ukrayinskyy.svitanok.pdf
7. European Commission. *Digital Education Action Plan 2021–2027*. Brussels: Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, 2021. URL: https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/actions
8. OECD. *Education at a Glance 2023: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing, 2023. doi: 10.1787/e13bef63-en
9. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку індивідуальних освітніх траєкторій та вдосконалення освітнього процесу: Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2024. № 29. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3642-20#Text

10. Magalhães A., Veiga A. Reconfiguring education and research in the European Higher Education Area. *Revista Lusófona de Educação*. 2018. No. 42. P. 11–25. doi: 10.24140/issn.1645-7250.rle42.01
11. Magalhães A., Veiga A. Models of higher education governance in Europe: From organised anarchy to business-corporate organisations. *International Journal of Film and Media Arts*. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 49–63. doi: 10.24140/ijfma.v7.n3.04
12. Bleiklie I., Enders J., Lepori B. *Managing universities*. Cham: Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-53865-5
13. CHEPS. *The extent and impact of higher education governance reform across Europe*. Brussels: European Commission, DG Education and Culture, 2007. URL: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5149063/Enders06extent1.pdf
14. European University Association. *University governance models: Toolkit for higher education institutions*. Brussels: EUA, 2020. URL: https://www.eua.eu/publications/briefings/evolving-models-of-university-governance.html
15. Bleiklie I., Kogan M. Organization and governance of universities. *Higher Education Policy*. 2007. Vol. 20, no. 4. P. 477–493. doi: 10.1057/palgrave.hep.8300167
16. de Boer H., Enders J. Working in the shadow of hierarchy: Organisational autonomy and venues of external influence in European universities. *Managing universities*. Cham: Springer, 2017. P. 57–83. doi: 10.1007/978-3-319-53865-5_3
17. Schimank U., Lange S. Germany: A latecomer to New Public Management. *University governance*. Dordrecht: Springer, 2009. P. 51–75. doi: 10.1007/978-1-4020-9515-3_3
18. Wilkins A. W., Mifsud D. What is governance? Projects, objects and analytics in education. *Journal of Education Policy*. 2024. Vol. 39, no. 3. P. 349–365. doi: 10.1080/02680939.2024.2320874
19. Kalebar R. U. et al. Strategic management in higher education: Navigating challenges and opportunities. *Journal of Informatics Education and Research*. 2024. P. 97–104. doi: 10.52783/jier.v4i2.717
20. Kayyali M. *Fundamentals of strategic management in higher education: Challenges, opportunities and future trends*. Hershey: IGI Global, 2024. doi: 10.4018/979-8-3693-6967-8.ch009
21. Jakobsen R. Public sector projectification – A systematic review of the literature. *Scandinavian Journal of Public Administration*. 2022. Vol. 26, no. 4. P. 91–112. doi: 10.58235/sjpa.v26i4.10588
22. Ahola T., Ruuska I., Artto K., Kujala J. What is project governance and what are its origins? *International Journal of Project Management*. 2014. Vol. 32, no. 8. P. 1321–1332. doi: 10.1016/j.ijproman.2013.09.005
23. 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*. Hersonissos, Crete, Greece, 2012. P. 286–292. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/8b6084a8-21be-4b22-a263-8f51d9e74030/download
24. Müller R., Zhai L., Wang A., Shao J. A framework for governance in the realm of projects: Governmentality, governance structure and projectification. *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34, no. 6. P. 957–969. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.05.002
25. Musawir A. U., Abd-Karim S. B. *Project governance: Enabling organizational strategy*. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/311843793_Project_Governance_Enabling_Organizational_Strategy
26. Musawir A. U., Serra C. E. M., Zwikael O., Ali I. Project governance, benefit realization, and the strategic impact of projects. *International Journal of Project Management*. 2017. Vol. 35, no. 4. P. 852–866. doi: 10.1016/j.ijproman.2017.03.005
27. Bekker M. C., Steyn H. Project governance: Definition and framework. *Journal of Contemporary Management*. 2009. Vol. 6. P. 214–228. URL: https://scielo.org.za/pdf/jcm/v6n1/12.pdf
28. Luo L., Liu Y., Yang Y., Xie J., Wu G. Interactive roles of megaproject governance mechanisms and their effects on governance performance. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2024. doi: 10.1108/ECAM-10-2023-1081
29. Torfing J., Peters B. G., Pierre J., Sørensen E. *Interactive governance: Advancing the paradigm*. Oxford: Oxford University Press, 2012. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199596751.001.0001
30. Thiry M., Deguire M. Recent developments in project-based organizations. *International Journal of Project Management*. 2007. Vol. 25, no. 7. P. 649–658. doi: 10.1016/j.ijproman.2007.02.001
31. Dewulf G., Garvin M. J. Responsive governance in PPP projects to manage uncertainty. *Construction Management and Economics*. 2020. Vol. 38, no. 4. P. 383–397. doi: 10.1080/01446193.2019.1618478
32. Duit A., Galaz V. Governance and complexity: Emerging issues for governance theory. *Governance*. 2008. Vol. 21, no. 3. P. 311–335. doi: 10.1111/j.1468-0491.2008.00402.x
33. Klakegg O. J., Williams T., Shiferaw A. T. Taming the "trolls": Major public projects in the making. *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34, no. 2. P. 282–296. doi: 10.1016/j.ijproman.2015.03.004
34. Brunet M., Aubry M. The three dimensions of a governance framework for major public projects. *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34, no. 8. P. 1596–1607. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.09.004
35. Aubry M., Brunet M. Organizational design in public administration: Categorization of project management offices. *Project Management Journal*. 2016. Vol. 47, no. 5. P. 107–129. doi: 10.1177/875697281604700508
36. Fumasoli T., Hladchenko M. Strategic management in higher education: Conceptual insights, lessons learned, emerging challenges. *Tertiary Education and Management*. 2023. Vol. 29. P. 331–339. doi: 10.1007/s11233-024-09134-5
37. Loch C. H., Kavadias S. A dynamic model of portfolio selection in new product development. *Management Science*. 2011. Vol. 57, no. 1. P. 1–18. doi: 10.1287/mnsc.1100.1243
38. Bertsekas D. P., Tsitsiklis J. N. Neuro-dynamic programming: An overview. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1996. Vol. 41, no. 11. P. 1576–1596. doi: 10.1109/9.544067

References (transliterated)

1. National Erasmus+ Office, HERE Team. *Overview of the key reforms and priorities in higher education of Ukraine*. Kyiv, Erasmus+ Programme of the European Union, 2024. Available at: https://erasmusplus.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/neo_heres_ukrainian-higher-education-reforms_2024-1.pdf
2. Eurydice. *National reforms in higher education – Ukraine*. Brussels, European Commission, EACEA, 2025. Available at: https://eurydice.eacea.ec.europa.eu/eurypedia/ukraine/national-reforms-higher-education
3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrayiny. *Pro realizatsiyu eksperymental'noho proyektu shchodo nadannya derzhavnykh hrantiv na zdobuttya vyshchoyi osvity no. 822 vid 18.07.2024* [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. On implementation of the experimental project on providing state grants for higher education no. 822 of 18.07.2024]. Available at: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-realizatsiiu-eksperymentalnoho-proektu-shchodo-nadannia-derzhavnykh-hrantiv-na-zdobuttia-vyshchoi-osvity-i180724-822
4. Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny. *Pro skhvalennya Stratehiyi rozvytku vyshchoyi osvity v Ukrayini na 2022–2032 roky no. 286-r vid 23.02.2022* [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine. On approval of the Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022–2032 no. 286-r of 23.02.2022]. Available at: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-rozvitku-vishchoyi-osviti-v-ukrayini-na-20222032-roki-286-
5. Ministerstvo osvity i nauky Ukrayiny. *Stratehiya rozvytku vyshchoyi osvity v Ukrayini na 2022–2032 roky* [Strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022–2032]. Kyiv, 2022. Available at: https://mon.gov.ua/osvita-2/vishcha-osvita-ta-osvita-doroslikh/strategiya-rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-na-2022-2032-roki
6. Ministerstvo osvity i nauky Ukrayiny. *Osvita 4.0: ukrayins'kyy svitanok* [Education 4.0: Ukrainian dawn]. Kyiv, 2022. Available at: https://mon.gov.ua/static-

objects/mon/sites/1/news/2022/12/10/Osvita-4.0.ukrayinskyy.svitanok.pdf
7. European Commission. *Digital Education Action Plan 2021–2027*. Brussels, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, 2021. Available at: https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/actions
8. OECD. *Education at a Glance 2023: OECD Indicators*. Paris, OECD Publishing, 2023. doi: 10.1787/e13bef63-en
9. Zakon Ukrayiny. *Pro vnesennya zmin do deyakykh zakoniv Ukrayiny shchodo rozvytku indyvidual'nykh osvitnikh trayektoriy ta vdoskonalennya osvitn'oho protsesu no. 29* [Law of Ukraine. On amendments to some laws of Ukraine regarding the development of individual educational trajectories and improvement of the educational process no. 29]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine]. 2024. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3642-20#Text
10. Magalhães A., Veiga A. Reconfiguring education and research in the European Higher Education Area. *Revista Lusófona de Educação*. 2018, no. 42, pp. 11–25. doi: 10.24140/issn.1645-7250.rle42.01
11. Magalhães A., Veiga A. Models of higher education governance in Europe: From organised anarchy to business-corporate organisations. *International Journal of Film and Media Arts*. 2022, vol. 7, no. 3, pp. 49–63. doi: 10.24140/ijfma.v7.n3.04
12. Bleiklie I., Enders J., Lepori B. *Managing universities*. Cham, Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-53865-5
13. CHEPS. *The extent and impact of higher education governance reform across Europe*. Brussels, European Commission, DG Education and Culture, 2007. Available at: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/5149063/Enders06extent1.pdf
14. European University Association. *University governance models: Toolkit for higher education institutions*. Brussels, EUA, 2020. Available at: https://www.eua.eu/publications/briefings/evolving-models-of-university-governance.html
15. Bleiklie I., Kogan M. Organization and governance of universities. *Higher Education Policy*. 2007, vol. 20, no. 4, pp. 477–493. doi: 10.1057/palgrave.hep.8300167
16. de Boer H., Enders J. Working in the shadow of hierarchy: Organisational autonomy and venues of external influence in European universities. *Managing universities*. Cham, Springer, 2017, pp. 57–83. doi: 10.1007/978-3-319-53865-5_3
17. Schimank U., Lange S. Germany: A latecomer to New Public Management. *University governance*. Dordrecht, Springer, 2009, pp. 51–75. doi: 10.1007/978-1-4020-9515-3_3
18. Wilkins A. W., Mifsud D. What is governance? Projects, objects and analytics in education. *Journal of Education Policy*. 2024, vol. 39, no. 3, pp. 349–365. doi: 10.1080/02680939.2024.2320874
19. Kalebar R. U. et al. Strategic management in higher education: Navigating challenges and opportunities. *Journal of Informatics Education and Research*. 2024, pp. 97–104. doi: 10.52783/jier.v4i2.717
20. Kayyali M. *Fundamentals of strategic management in higher education: Challenges, opportunities and future trends*. Hershey, IGI Global, 2024. doi: 10.4018/979-8-3693-6967-8.ch009
21. Jakobsen R. Public sector projectification – A systematic review of the literature. *Scandinavian Journal of Public Administration*. 2022, vol. 26, no. 4, pp. 91–112. doi: 10.58235/sjpa.v26i4.10588
22. Ahola T., Ruuska I., Artto K., Kujala J. What is project governance and what are its origins? *International Journal of Project Management*. 2014, vol. 32, no. 8, pp. 1321–1332. doi: 10.1016/j.ijproman.2013.09.005
23. 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*. Hersonissos, Crete, Greece, 2012, pp. 286–292. Available at: https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/8b6084a8-21be-4b22-a263-8f51d9e74030/download
24. Müller R., Zhai L., Wang A., Shao J. A framework for governance in the realm of projects: Governmentality, governance structure and projectification. *International Journal of Project Management*. 2016, vol. 34, no. 6, pp. 957–969. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.05.002
25. Musawir A. U., Abd-Karim S. B. *Project governance: Enabling organizational strategy*. 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/311843793_Project_Governance_Enabling_Organizational_Strategy
26. Musawir A. U., Serra C. E. M., Zwikael O., Ali I. Project governance, benefit realization, and the strategic impact of projects. *International Journal of Project Management*. 2017, vol. 35, no. 4, pp. 852–866. doi: 10.1016/j.ijproman.2017.03.005
27. Bekker M. C., Steyn H. Project governance: Definition and framework. *Journal of Contemporary Management*. 2009, vol. 6, pp. 214–228. Available at: https://scielo.org.za/pdf/jcm/v6n1/12.pdf
28. Luo L., Liu Y., Yang Y., Xie J., Wu G. Interactive roles of megaproject governance mechanisms and their effects on governance performance. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2024. doi: 10.1108/ECAM-10-2023-1081
29. Torfing J., Peters B. G., Pierre J., Sørensen E. *Interactive governance: Advancing the paradigm*. Oxford, Oxford University Press, 2012. doi: 10.1093/acprof:oso/9780199596751.001.0001
30. Thiry M., Deguire M. Recent developments in project-based organizations. *International Journal of Project Management*. 2007, vol. 25, no. 7, pp. 649–658. doi: 10.1016/j.ijproman.2007.02.001
31. Dewulf G., Garvin M. J. Responsive governance in PPP projects to manage uncertainty. *Construction Management and Economics*. 2020, vol. 38, no. 4, pp. 383–397. doi: 10.1080/01446193.2019.1618478
32. Duit A., Galaz V. Governance and complexity: Emerging issues for governance theory. *Governance*. 2008, vol. 21, no. 3, pp. 311–335. doi: 10.1111/j.1468-0491.2008.00402.x
33. Klakegg O. J., Williams T., Shiferaw A. T. Taming the "trolls": Major public projects in the making. *International Journal of Project Management*. 2016, vol. 34, no. 2, pp. 282–296. doi: 10.1016/j.ijproman.2015.03.004
34. Brunet M., Aubry M. The three dimensions of a governance framework for major public projects. *International Journal of Project Management*. 2016, vol. 34, no. 8, pp. 1596–1607. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.09.004
35. Aubry M., Brunet M. Organizational design in public administration: Categorization of project management offices. *Project Management Journal*. 2016, vol. 47, no. 5, pp. 107–129. doi: 10.1177/875697281604700508
36. Fumasoli T., Hladchenko M. Strategic management in higher education: Conceptual insights, lessons learned, emerging challenges. *Tertiary Education and Management*. 2023, vol. 29, pp. 331–339. doi: 10.1007/s11233-024-09134-5
37. Loch C. H., Kavadias S. A dynamic model of portfolio selection in new product development. *Management Science*. 2011, vol. 57, no. 1, pp. 1–18. doi: 10.1287/mnsc.1100.1243
38. Bertsekas D. P., Tsitsiklis J. N. Neuro-dynamic programming: An overview. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1996, vol. 41, no. 11, pp. 1576–1596. doi: 10.1109/9.544067

Надійшла (received) 05.02.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Кухарський Віталій Михайлович (Kukharskyy Vitaliy) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів, Україна. e-mail: vitaliy.kukharskyy@lnu.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2775-6401.

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

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

УДК 658.5:004.94:631 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.8

П. М. ЛУБ, Р. І. ПАДЮКА, А. В. ТАТОМИР, Н. Б. ЗАПЛАТИНСЬКИЙ

АЛГОРИТМ УЗГОДЖЕННЯ ЧАСУ ПОЧАТКУ, ОБСЯГІВ ТА ТЕМПІВ РОБІТ У ПРОЄКТАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Розкрито інформаційно-управлінське завдання щодо підвищення ефективності управління проєктами технологічних систем у рільництві із врахуванням ймовірнісного впливу агрометеорологічних умов та сукупного впливу проєктного середовища. Основну увагу акцентовано на тому, що імовірнісний характер природно-кліматичних умов істотно ускладнює узгодження строків, обсягів і темпів виконання робіт, що безпосередньо впливає на рівень урожайності та економічні результати аграрних підприємств. Акцентовано на доцільності використання сучасних інформаційних технологій, методів моделювання й інформаційно-аналітичних систем для підтримки прийняття управлінських рішень під час планування та реалізації проєктів технологічних систем. Наведено теоретичні передумови щодо системності та часткової керованості процесів формування показників ефективності зазначених проєктів. Розкрито методологічний підхід, який базується на інтеграції відкритих інформаційних ресурсів, багаторічних агрометеорологічних даних і результатів виробничих спостережень із IT-сервісами для імітаційного моделювання сезонного виконання робі у віртуальних проєктах технологічних систем. Розроблено алгоритм узгодження складових проєктів технологічних систем рільництва, а також створено програмний засіб що дає змогу виконувати статистичне імітаційне моделювання для відповідних робіт у проєктах, а відтак оцінювати показники ефективності виконання відповідних робіт, їх своєчасність і статистичні характеристики, ризики та закономірності зміни. Розкрито структуру і головні етапи функціонування статистичної імітаційної моделі віртуального проєкту, яка дає змогу відтворювати ймовірнісну динаміку проєктного середовища, оцінювати природно зумовлений фонд часу виконання робіт і продуктивність технічних засобів, а також здійснювати багаторазовий аналіз альтернативних сценаріїв реалізації згаданих проєктів. Практичну апробацію методики виконано на прикладі проєктів збирання врожаю цукрових буряків із використанням багаторічних даних агрометеорологічної станції. За результатами комп'ютерних експериментів встановлено статистичні характеристики оптимального часу початку робіт і фактично зібраних площ, а також обґрунтовано відповідні закони їх розподілу. Підтверджено можливість підвищення обґрунтованості управлінських рішень, зниження ризиків і забезпечення максимального збору врожаю шляхом узгодження часу початку, обсягів і темпів робіт із врахуванням ймовірнісної поведінки проєктного середовища.

Ключові слова: алгоритм, проєкти, узгодження, технологічна система, програмний засіб, моделювання, управління, ефективність.

P. M. LUB, R. I. PADYUKA, A.V. TATOMYR, N.B. ZAPLATYNSKYI

AN ALGORITHM FOR COORDINATING THE START TIME, WORK VOLUMES, AND EXECUTION RATES IN TECHNOLOGICAL SYSTEM PROJECTS

The article addresses an information and management problem aimed at improving the efficiency of managing projects of technological systems in arable farming, taking into account the probabilistic influence of agrometeorological conditions and the combined impact of the project environment. Emphasis is placed on the fact that the probabilistic nature of natural and climatic conditions significantly complicates the coordination of schedules, work volumes, and execution rates, which directly affects crop yields and the economic performance of agricultural enterprises. The expediency of applying modern information technologies, modeling methods, and information-analytical systems to support managerial decision-making during the planning and implementation of technological system projects is substantiated. The theoretical prerequisites related to the systemic nature and partial controllability of the processes forming the efficiency indicators of such projects are outlined. A methodological approach based on the integration of open information resources, long-term agrometeorological data, and production observation results with IT services for simulation modeling of seasonal work execution in virtual projects of technological systems is presented. An algorithm for coordinating the components of arable farming technological system projects has been developed, along with a software tool that enables statistical simulation modeling of the relevant project works and, consequently, the evaluation of performance indicators, timeliness, statistical characteristics, risks, and patterns of change. The structure and main stages of functioning of a statistical simulation model of a virtual project are described, allowing the reproduction of the probabilistic dynamics of the project environment, the assessment of the naturally determined time fund for work execution and the productivity of technical equipment, as well as repeated analysis of alternative project implementation scenarios. The methodology was practically tested using sugar beet harvesting projects based on long-term data from an agrometeorological station. The results of computer experiments made it possible to determine the statistical characteristics of the optimal start time of operations and the actually harvested areas, as well as to substantiate the corresponding distribution laws. The study confirms the possibility of improving the validity of managerial decisions, reducing risks, and ensuring maximum crop harvesting by coordinating the start time, volumes, and execution rates of works while accounting for the probabilistic behavior of the project environment.

Keywords: algorithm, projects, coordination, technological system, software tool, modeling, management, efficiency.

Вступ. У нинішніх умовах цифрової трансформації інформаційні технології та цифрові сервіси відіграють ключову роль у функціонуванні національної економіки, охоплюючи практично всі галузі – від сфери послуг і торгівлі до енергетики, транспорту та агропромислового комплексу [1]. Сільське господарство характеризується безпосереднім зв'язком із природно-кліматичними умовами, зокрема із рівнем вологості, температурним режимом та іншими агрометеорологічними показниками, вплив яких неможливо нівелювати в процесі виробництва. За таких умов ефективне планування та виконання польових робіт вимагають активного впровадження інформаційних систем, методів моделювання й інструментів підтримки прийняття рішень, що базуються на систематичному зборі, структуруванні та аналітичній обробці даних.

Розвиток сучасних інформаційно-аналітичних рішень передбачає використання даних агрометеорологічних станцій, інформації безпосередньо від виробників, а також застосування математичних моделей і комп'ютерного моделювання для оцінювання кліматичних умов, динаміки росту сільськогосподарських культур і реалізацію коректних

© П. М. Луб, Р. І. Падюка, А. В. Татомир, Н. Б. Заплатинський, 2026

методики відображення їх сукупного впливу на виконання агротехнологічних операцій [2, 3, 4, 5]. Такі підходи дають змогу аналізувати альтернативні сценарії розвитку, досліджувати технологічну ефективність модельованої виробничої системи, причинно-наслідкові зв'язки формування ризиків, раціонально розподіляти ресурси в часі та підвищувати загальну ефективність виробництва в умовах ймовірнісного впливу кліматичних ризиків.

Паралельно з цим цифровізація аграрного сектору сприяє формуванню єдиного інформаційного простору, в якому цифрові платформи значно активізують обмін знаннями між фермерами, науковими установами та органами державного управління, а також забезпечують глибшу інтеграцію інформаційних систем у процеси управління агровиробництвом. Значні обсяги агрометеорологічних даних у поєднанні з технологіями дистанційного зондування Землі, геоінформаційними системами, методами Big Data та аналітики зумовлюють зростання складності інформаційних систем і моделей, що описують поведінку виробничих систем, водночас відкриваючи нові можливості для управління проєктами, підвищення ефективності та конкурентоспроможності аграрної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що інформаційні технології дедалі активніше інтегруються в різні сфери аграрного виробництва. Їх застосування охоплює не лише маркетингові інструменти для просування продукції та виходу на ринки збуту, але й цифрові засоби взаємодії з партнерами та дилерськими мережами. Водночас IT-рішення широко використовуються для дистанційного контролю використання матеріально-технічних і енергетичних ресурсів під час виконання польових робіт, а також для оперативного планування й коригування виробничих процесів з урахуванням поточних умов [2, 3, 4, 5]. На сучасному етапі розвитку агросектору інформаційні технології створюють передумови для формування комплексних інформаційно-аналітичних систем, що базуються на сукупності взаємопов'язаних імітаційних моделей [3, 6, 7]. Кожна з таких моделей відображає окремий компонент функціонування виробничої системи – агрометеорологічні чинники, технологічні операції, логістичні процеси, рух матеріальних потоків або управлінські механізми [3]. Поєднання цих компонентів у межах єдиної системи дає змогу отримати цілісне уявлення про динаміку агровиробництва та підвищити обґрунтованість управлінських рішень.

Узагальнення результатів наукових досліджень у галузі агропромислового комплексу підтверджує високу актуальність подальшого розвитку й удосконалення відповідних методів, моделей та інформаційних систем. Їх практичне використання істотно знижує складність управління проєктами, забезпечує ефективну підтримку прийняття рішень на стратегічному й тактичному рівнях та формує надійне інформаційне підґрунтя для розвитку агробізнесу, зокрема через використання фінансових інструментів, таких як ф'ючерсні угоди та кредитні механізми тощо.

Постановка завдання. Метою статті є розкрити теоретичні передумови, алгоритм узгодження складових технологічних проєктів рільництва та представити результати розроблення програмного засобу імітаційної моделі й виконання на його основі комп'ютерних експериментів.

Виклад основного матеріалу. Своєчасне виконання польових робіт у рільництві є одним із базових чинників, що безпосередньо впливає на рівень урожайності сільськогосподарських культур і, відповідно, на фінансово-економічні результати діяльності аграрних підприємств [1, 8]. Річний обсяг виробництва формується під впливом сукупності факторів, серед яких домінують природні умови, що характеризуються високим ступенем невизначеності та обмеженими можливостями управлінського впливу. Саме ця залежність зумовлює складність планування й реалізації технологічних процесів у рільництві [9, 10].

Імовірнісний характер агрометеорологічних умов відповідного сезону обумовлює потребу в постійному уточненні строків виконання окремих технологічних операцій, перегляді їх змісту та коригуванні потреб у матеріально-технічних, енергетичних і трудових ресурсах. У таких умовах зростає роль оперативного моніторингу стану зовнішнього середовища та доступу до актуальної й достовірної інформації, необхідної для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо доцільності змін у технологіях вирощування сільськогосподарських культур [10].

За цих передумов управління технологічними системами рільництва та планування сезонних польових робіт потребують впровадження сучасних інформаційно-аналітичних систем, побудованих на основі інформаційних технологій. Використання таких систем дає змогу підвищити якість управлінських рішень і забезпечити досягнення планових виробничих показників. Особливого значення набуває розробка моделей, які здатні одночасно враховувати галузеву специфіку рільництва та вплив некерованих природних факторів зовнішнього середовища, що сприяє оптимізації строків виконання робіт, підвищенню адаптивності управління та загальної ефективності виробничих процесів.

Водночас прикладна специфіка рільництва зумовлює необхідність тісної узгодженості виробничих операцій із природними процесами, зокрема ростом і розвитком культурних рослин, змінами агрометеорологічних умов, формуванням агрофону полів і станом ґрунтової родючості, що додатково ускладнює завдання планування та управління в аграрному виробництві [4, 5, 8].

Відповідно до положень теорії систем і методології моделювання, будь-який реальний

фізичний або технологічний процес може бути поданий у формалізованому вигляді, що створює передумови для його дослідження, аналізу та відтворення за різних початкових і зовнішніх умов [9, 11-13]. Такий підхід дає змогу здійснювати порівняльний аналіз альтернативних сценаріїв виконання польових робіт, прогнозувати можливі ризики та обґрунтовувати управлінські рішення для підтримки прийняття рішень на оперативному, тактичному й стратегічному рівнях. Застосування інформаційних технологій у цьому контексті забезпечує поєднання різнорівневих інструментів – від мобільних рішень і сенсорних систем збору даних до комплексних вебплатформ і корпоративних систем управління агровиробництвом, що підвищує точність планування, швидкість реагування на зміни та загальну прогнозованість виробничих систем рільництва.

Побудова моделей технологічних систем у рільництві розпочинається з ґрунтовного аналізу причинно-наслідкових зв'язків і формалізації ключових елементів, які визначають ефективність їх функціонування. Особливу увагу на цьому етапі приділяють математичному опису параметрів, що безпосередньо впливають на результати виробничої діяльності [9]. Тривалість виконання польових робіт в агросекторі визначається сукупною дією низки чинників, серед яких присутні як керовані параметри технологічного процесу, так і некеровані впливи, пов'язані з агрометеорологічними та біологічними умовами [7, 11, 14].

З урахуванням імовірнісної природи таких впливів особливого значення набуває пошук і встановлення статистичних закономірностей зміни природно зумовленого фонду часу, у межах якого можливе виконання технологічних операцій із використанням відповідних технічних засобів. Зокрема, визначення тривалості фонду часу для роботи техніки у періоду збирання врожаю дає змогу більш адекватно враховувати обмеження зовнішнього середовища, підвищувати точність прогнозів і обґрунтованість управлінських рішень у процесі планування та організації цих та інших робіт.

Запропонований підхід до виявлення зазначених закономірностей базується на інтеграції відкритих інформаційних джерел, впорядкованих масивів даних, отриманих у процесі виробничих спостережень, а також результатів чисельних комп'ютерних експериментів, реалізованих на основі статистичної імітаційної моделі [14, 15]. Відомо, що імітаційні моделі можна побудувати за різними методами. Нами використано метод Монте-Карло, який застосовується для аналізу систем із високою невизначеністю шляхом багаторазового моделювання "випадкових сценаріїв" із подальшою статистичною обробкою результатів.

Випадкові сценарії генеруються на основі включення до статистичної імітаційної моделі ймовірнісних подій, властивих для періоду збирання врожаю. Це дає змогу виконувати багаторазове моделювання (ітерації моделі) і відтворювати мінливість впливу агрометеорологічних чинників як на зміну природно зумовленого фонду часу для збирання врожаю (tnз), так і на показники добової продуктивності (Wдоб) технічних засобів (комбайнів) і своєчасність польових робіт загалом.

Виконання комп'ютерного моделювання та математичний аналіз отриманих результатів дозволяє не лише встановити статистичні характеристики tnз в межах заданого календарного періоду, але й здійснити оцінку ризиків. Відомо [4, 7], що параметр tnз характеризує часовий проміжок між плановим початком збиральних робіт (τпр) та моментом настання критичних умов, за яких подальше виконання технологічних операцій стає недоцільним.

Керуючись цими теоретичними положеннями нами розроблено алгоритм узгодження складових проєктів технологічної системи на підставі методів моделювання (для прикладу збирання врожаю цукрових буряків) (рис. 1). Цей підхід ґрунтується на нових методиках, методах і моделях, а також використовує статистичне імітаційне моделювання віртуального проєкту завдяки розробленому програмному засобу [12, 13]. Використання цього інструментарію дає змогу менеджерам проєктів підвищити ефективність управлінських рішень у відповідних технологічних системах. Це досягається завдяки узгодженню часу початку, обсягів та темпів виконання польових робіт із ймовірнісним розвитком агрометеорологічної та предметної складових їх проєктного середовища [6, 16, 17]. Це узгодження дає змогу забезпечити максимальний збір вирощеного урожаю.

Реалізація цих етапів дослідження здійснюється на підставі певних процедур і правил, що сукупно окреслюють сутність методики узгодження складових проєкту технологічної системи із умовами проєктного середовища.

Попереднє формування початкових даних (блок 1) щодо можливих обсягів робіт (збирання врожаю) та потужності технічного оснащення уможливлює формування складових цих проєктів (блок 2). База знань (блок 1) формується на підставі спостережень метеорологічної станції за розвитком агрометеорологічної та предметної складових проєктного середовища та є основою для формалізації і наступного відображення їх розвитку в статистичній імітаційній моделі віртуального проєкту.

засобу цієї моделі здійснюється ретроспективна кількість реалізацій та моделюється перебіг робіт у проєктах за різного розвитку агрокліматичних умов і різних планових термінів їх початку τпр (блок 3). Аналіз отриманих результатів (блок 4) дає змогу встановити середньобагаторічні терміни оптимального початку робіт у проєктах, за яких досягатиметься умова (Qф→тах) максимального обсягу (Qф) фактично зібраного врожаю (блок 5). У результаті цього узгоджуються обсяги і темпів робіт у проєктах (блок 6), що дає змогу виконати орієнтовне планування робіт та оцінити ефективність як

управління ВТР, так і робіт у згаданих проєктах загалом.

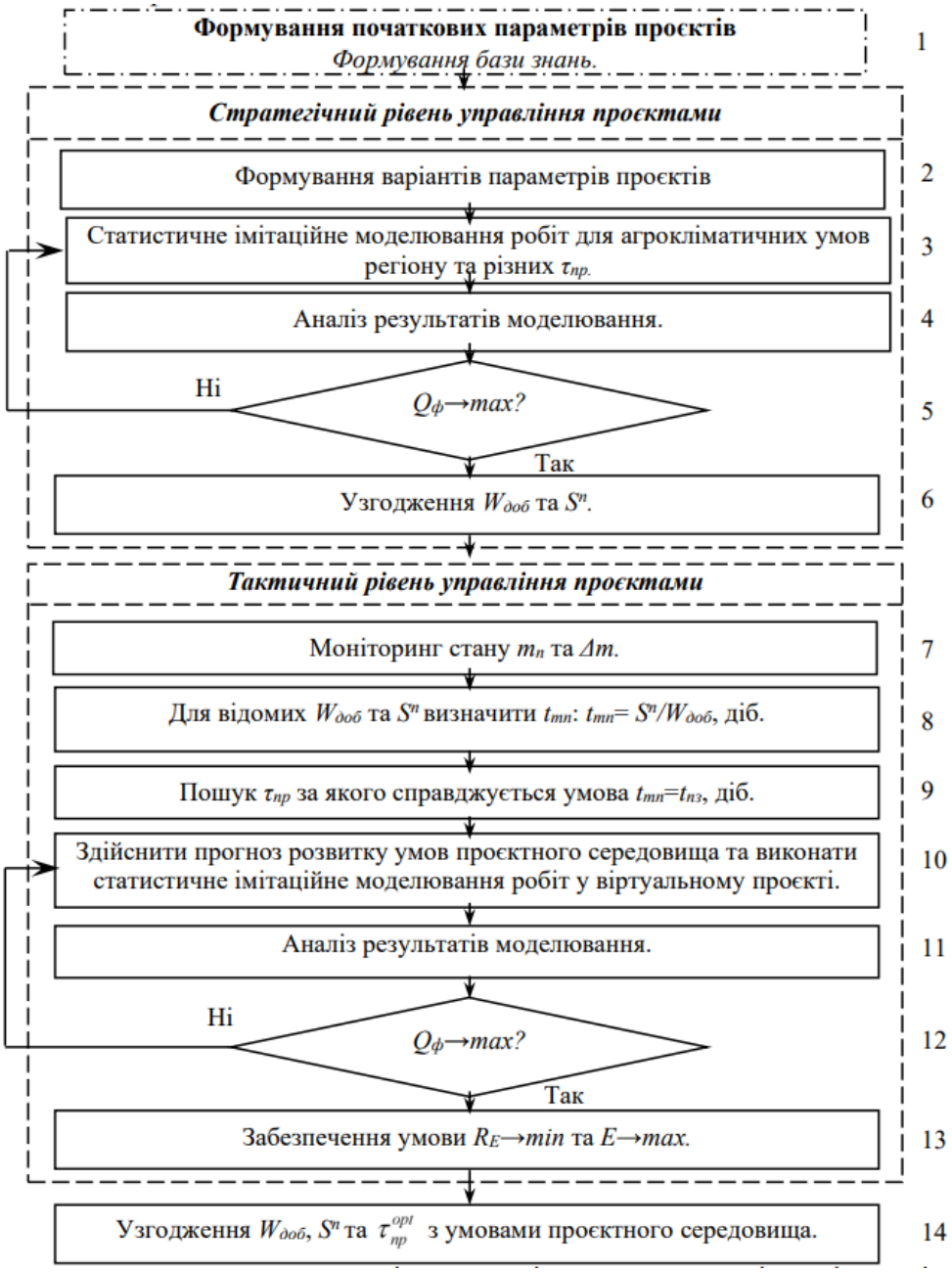

Рис. 1. Алгоритм узгодження складових проєктів технологічної системи на підставі методів моделювання

Отримані показники уточнюються на тактичному рівні управління. Зокрема, керуючись встановленими на стратегічному рівні управління проєктів середньобагаторічними термінами оптимального початку робіт, здійснюють їх планування, а також моніторинг динаміки поточної зміни умов проєктного середовища (блок 7).

Відповідно до обсягів і темпів робіт визначають технологічно потрібний фонд часу (тгп) (блок 8). Тоді, керуючись базою знань, зокрема залежністю тривалості (тпз) природно зумовленого фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт від часу початку робіт та ризиком цих показників, визначають календарний термін, за якого виникатиме умова рівності між тгп і тпз (блок 9). Відштовхуючись від цього терміну та даних моніторингу за предметними умовами, здійснюють прогноз наступного розвитку умов агрометеорологічної та предметної складових проєктного середовища і виконують статистичне імітаційне моделювання робіт у віртуальному проєкті за різних планових термінів їх початку (блок 10). Аналіз результатів (блок 11) цього моделювання дає змогу відшукати такий календарний термін початку робіт за якого досягатиметься умова Qф→тах (блок 12). Початок робіт у цей день дає змогу забезпечити виконання умови RE→тіп та E→тах (блок 13), а відтак узгодити обсяг, темп і час початку робіт у проєктах із

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

відповідними умовами окремого року їх реалізації (блок 14).

Для практичної реалізації наведеної методики нами використано структури даних агрометерологічної станції Володимирського району Волинської області (для періоду 30 років). Багаторазова реалізація комп'ютерної програми статистичної імітаційної моделі віртуального проєкту дала змогу синтезувати дію чинників ефективності цих проєктів, відтворити системно-подієві особливості формування умов проєктного середовища, а також їх вплив на перебіг польових робіт. Виконання комп'ютерних експериментів із моделлю віртуального проєкту, для якого наперед задано обсяги та темпи робіт (бурякозбиральний комбайн потужністю – 170 кВт), уможливило отримання вичерпної множини показників цих проєктів. Систематизація й опрацювання цих інтегрованих функціональних показників на підставі методів математичної статистики та застосування критерію χ^2 Пірсона уможливили обґрунтування моделей їх ризику (рис. 2 та рис. 3) [12, 13].

Опрацювання результатів комп'ютерних експериментів на підставі методів математичної статистики дало змогу встановити статистичні характеристики ризику у проєктах технологічних систем збирання врожаю та обґрунтувати розподіли: 1) оптимального часу (τ_{np}^{opt}) початку бурякозбиральних робіт (рис. 2), доба; 2) обсягів ($S_ф$) фактично зібраних площ (рис. 3), га.

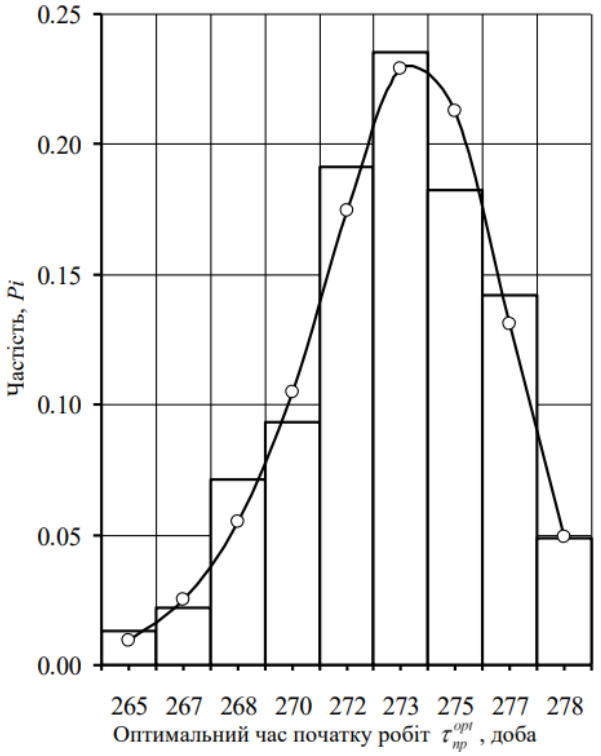

Рис. 2. Гістограма та теоретична крива розподілу оптимального часу початку збирання врожаю цукрових буряків для умов Володимирського р-ну (закон Лапласа-Шарльє).

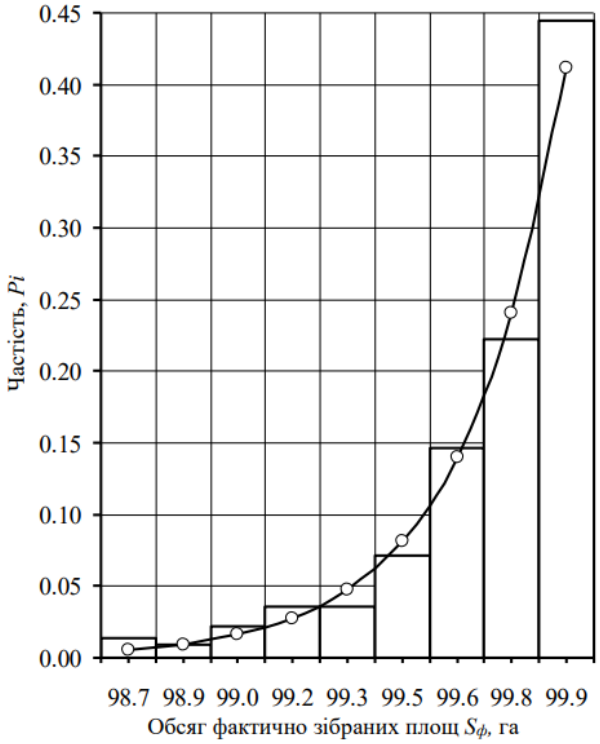

Рис. 3. Гістограма та теоретична крива розподілу обсягу фактично зібраних площ цукрових буряків за τ_{np}^{opt} у проєктах (степеневий закон).

На підставі критерію χ^2 Пірсона обґрунтовано, що емпіричний розподіл τ_{np}^{opt} узгоджується з чотирипараметричним законом Лапласа-Шарльє, а $S_ф$ із законом степеневого розподілу.

Зокрема, диференціальна функція розподілу τ_{np}^{opt} має вигляд:

$$f\left(\tau_{np}^{opt}\right) = 0,137 \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \left\{1 - 0,08 \cdot t \cdot (t^2 - 3) + 0,00003 \cdot \left[t \cdot (t^2 - 2) - 3(t^2 - 1)\right]\right\};$$

$$t = \frac{\tau_{np}^{opt} - 272,944}{2,919}. \qquad (1)$$

Головні статистичні характеристики розподілу τ_{np}^{opt}: $\bar{M}[\tau_{np}^{opt}]$ = 272,9 доба; $\upsilon[\tau_n^{\kappa}]$ = 0,326. Довірчий інтервал τ_{np}^{opt} лежить у межах 264…279 доби.

Диференціальна функція Sф має вигляд:

$$f(S_ф) = 0,54\left(\frac{S_ф}{100}\right)^{361.918}, \qquad (2)$$

Головні статистичні характеристики розподілу $S_ф$: $\bar{M}[S_ф]$ = 99,7 га; $\upsilon[S_ф]$ = 0,177. Довірчий інтервал Sф лежить у межах 97,9…100 га.

Встановлені статистичні характеристики функціональних показників є важливою підставою управління проєктами технологічних систем збирання врожаю на підставі узгодження часу початку, обсягу та темпів робіт із врахуванням ймовірнісної поведінки проєктного середовища.

Висновки. Використання інформаційних технологій і методів статистичного імітаційного моделювання є ефективним інструментом підвищення ефективності управління проєктами технологічних систем у рільництві із врахуванням стохастичного впливу проектного середовища. Такий підхід дає змогу формалізувати складні виробничі процеси та враховувати невизначеність низки чинників зовнішнього середовища під час планування та реалізації проєктів технологічних систем. Реалізована методологія дослідження базується на комп'ютерних експериментах щодо виконання віртуальних проектів технологічної системи збирання врожаю із заданими параметрами та об'єктивним відображенням впливу проектного середовища. Розроблений алгоритм узгодження часу початку, обсягів і темпів виконання робіт дозволяє виконати дослідження й забезпечити більш обґрунтований вибір управлінських рішень шляхом аналізу альтернативних сценаріїв реалізації проєктів. Застосування цього підходу дає змогу оцінити виробничі ризики, оптимізувати використання ресурсів і підвищити гнучкість управління технологічними системами.

Застосування програмного засобу статистичної імітаційної моделі віртуального проєкту технологічної системи дало змогу довести можливість обґрунтування оптимального часу початку робіт, за якого забезпечуються мінімальний ризик та максимальна ефективність цих проєктів. Зокрема, виконання комп'ютерних експериментів (для початкових умов: виробнича програма – 100 га, технічне оснащення потужністю – 170 кВт, поточна маса коренеплодів цукрових буряків – 460,39 г) за модельованих умов проєктного середовища дало змогу встановити статистичні характеристики та ризик відповідних функціональних показників. Встановлено, що для заданих параметрів технологічної системи оптимальний час початку робіт знаходитиметься у межах 22 вересня – 7 жовтня (264-279 доби) ($\bar{M}[\tau_{пр}^{opt}]$ = 272,9 доба; $\upsilon[\tau_{n}^{к}]$ = 0,326), а розподіл цього показника узгоджується із теоретичним законом Лапласа-Шарльє (див. рис. 2). Відповідно, розподіл обсягів фактично зібраних площ ($\bar{M}[S_{ф}]$ = 99,7 га; $\upsilon[S_{ф}]$ = 0,177) узгоджується із степеневим законом (див. рис. 3).

Список літератури

1. *У держбюджет-2026 заклали 14,1 млрд грн на програми підтримки аграріїв*. 2025. URL: https://agrotimes.ua/agromarket/u-derzhbyudzhet-2026-zaklaly-141-mlrd-grn-na-programy-pidtrymky-agrariyiv/ (дата звернення: 23.01.2026).
2. Днесь В. І. *Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2015. 20 с.
3. Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки прийняття рішень. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2024. № 28. С. 188–193. doi: 10.31734/agroengineering2024.28.191
4. Пукас В. Л. *Обґрунтування параметрів технічного забезпечення технологічного процесу збирання цукрових буряків*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11. Львів, 2020. 22 с.
5. Спічак В. С. *Управління виробничо-технологічним ризиком у проектах збирання цукрових буряків*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.22. Львів, 2010. 23 с.
6. Зюзюн В. І. Дослідження поняття похідних ризиків від розвитку зовнішнього впливу в аспекті діяльності об'єктів господарювання та їх стратегічної стабільності. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2024. № 2 (9). С. 27–34. doi: 10.36930/40340316
7. Луб П. М., Березовецький С. А., Падюка Р. І., Чубик Р. В. Інформаційно-аналітичний супровід прийняття рішень у проєктах розвитку технологічних систем збирання врожаю. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами»*. 2022. № 2 (6). С. 53–57. doi: 10.20998/2413-3000.2022.6.10
8. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Вольвач О. В. *Основи агрометеорології: підручник*. Одеса: ТЕС, 2012. 250 с.
9. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. *General system theory: foundations, development, applications*. 1st ed. New York, NY: George Braziller Inc., 2015.
10. Lub P., Berezovetsky S., Chubyk R., Ptashnyk V. The research of technological risk of the harvesting projects on the basis of simulation modelling. *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT2021)*. Lviv: IEEE, 2021. P. 359–363. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648701
11. Jiang W., Shi A., Liu H. Enterprise risk management model based on artificial intelligence algorithms and digital transformation. *Second International Conference on Data Science and Information System (ICDSIS)*. 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/ICDSIS61070.2024.10594050.
12. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. *Simulation and the Monte Carlo method*. 3rd ed. New Jersey: Wiley, 2016. doi: 10.1002/9781118631980
13. Schildt H. *C#: The Complete Reference*. Osborne: The McGraw-Hill Companies, 2003.
14. Dooley K. Simulation research methods. *Companion to Organizations* / ed. Joel Baum. London: Blackwell, 2002. P. 829–848.
15. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization – A Review. *Materials*. 2024. Vol. 17, no. 14. 3521. doi: 10.3390/ma17143521
16. Minyan S. Research on the application mode of financial engineering from the perspective of exchange rate risk management. *International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*. 2020. P. 467–470. doi: 10.1109/ICRIS52159.2020.00120
17. Stoyanova V., Danov P. Comparative analysis of specialized standards and methods on increasing the effectiveness and role of PDCA for risk control in management systems. *10th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI)*. 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/COMSCI55378.2022.9912583

References (transliterated)

1. *U derzhbyudzhet-2026 zaklaly 14,1 mlrd hrn na prohramy pidtrymky ahrariyiv* [The state budget 2026 includes UAH 14.1 billion for farmer support programs]. Available at: https://agrotimes.ua/agromarket/u-derzhbyudzhet-2026-zaklaly-141-mlrd-grn-na-programy-pidtrymky-agrariyiv/ (accessed 23.01.2026).
2. Dnes' V. I. *Obgruntuvannya parametriv zernozbyral'no-transportnykh kompleksiv dlya sil's'kohospodars'kykh tovarovyrobnykiv: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand.*

tekhn. nauk: spets. 05.05.11 [Substantiation of parameters of grain-harvesting and transport complexes for agricultural producers. Abstract of a thesis candidate tech. sci. diss. 05.05.11]. Hlevakha, 2015. 20 p.
3. Lub P., Smolins'kyy V., Padyuka R., Boyarchuk O., Stan'ko V. Vykorystannya imitatsiynoho modelyuvannya v informatsiynykh systemakh pidtrymky pryynyattya rishen' [Use of simulation modeling in information systems for decision support]. *Visnyk L'vivs'koho natsional'noho universytetu pryrodokorystuvannya. Seriya "Ahroinzhenerni doslidzhennya"* [Bulletin of Lviv National Environmental University. Series "Agroengineering Research"]. 2024, no. 28, pp. 188–193. doi: 10.31734/agroengineering2024.28.191
4. Pukas V. L. *Obgruntuvannya parametriv tekhnichnoho zabezpechennya tekhnolohichnoho protsesu zbyrannya tsukrovykh buryakiv: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: 05.05.11* [Substantiation of parameters of technical support for the technological process of sugar beet harvesting. Abstract of a thesis candidate tech. sci. diss. 05.05.11]. Lviv, 2020. 22 p.
5. Spichak V. S. *Upravlinnya vyrobnycho-tekhnolohichnym ryzykom u proektakh zbyrannya tsukrovykh buryakiv: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.22* [Management of production and technological risk in sugar beet harvesting projects. Abstract of a thesis candidate tech. sci. diss. 05.13.22]. Lviv, 2010. 23 p.
6. Zyuzyun V. I. Doslidzhennya ponyattya pokhidnykh ryzykiv vid rozvytku zovnishn'oho vplyvu v aspekti diyal'nosti ob'yektiv hospodaryuvannya ta yikh stratehichnoyi stabil'nosti [Research of the concept of derivative risks from the development of external influence in the aspect of business entities' activities and their strategic stability]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2024, no. 2 (9), pp. 27–34. doi: 10.36930/40340316
7. Lub P. M., Berezovets'kyy S. A., Padyuka R. I., Chubyk R. V. Informatsiyno-analitychnyy suprovid pryynyattya rishen' u proyektakh rozvytku tekhnolohichnykh system zbyrannya vrozhayu [Information and analytical support for decision-making in projects for the development of technological crop harvesting systems]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya "Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy"* [Bulletin of NTU "KhPI". Series "Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management"]. 2022, no. 2 (6), pp. 53–57. doi: 10.20998/2413-3000.2022.6.10
8. Pol'ovyy A. M., Bozhko L. Yu., Vol'vach O. V. *Osnovy ahrometeorolohiyi: pidruchnyk* [Fundamentals of agrometeorology: textbook]. Odesa, Vydavnytstvo TES Publ., 2012. 250 p.
9. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. *General system theory. Foundations, development, applications*. 1st ed. New York, NY, George Braziller Inc., 2015.
10. Lub P., Berezovetsky S., Chubyk R., Ptashnyk V. The research of technological risk of the harvesting projects on the basis of simulation modelling. *Proceedings of 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT2021*. Lviv, IEEE, 2021, pp. 359–363. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648701
11. Jiang W., Shi A., Liu H. Enterprise risk management model based on artificial intelligence algorithms and digital transformation. *Second International Conference on Data Science and Information System (ICDSIS)*. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICDSIS61070.2024.10594050
12. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. *Simulation and the Monte Carlo method*. 3rd ed. New Jersey, Wiley, 2016. doi: 10.1002/9781118631980
13. Schildt H. *C#: The Complete Reference*. Osborne, The McGraw-Hill Companies, 2003.
14. Dooley K. Simulation research methods. *Companion to Organizations*. Joel Baum, ed. London, Blackwell, 2002, pp. 829–848.
15. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization – A Review. *Materials*. 2024, vol. 17, no. 14, article 3521. doi: 10.3390/ma17143521
16. Minyan S. Research on the application mode of financial engineering from the perspective of exchange rate risk management. *International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS)*. 2020, pp. 467–470. doi: 10.1109/ICRIS52159.2020.00120
17. Stoyanova V., Danov P. Comparative analysis of specialized standards and methods on increasing the effectiveness and role of PDCA for risk control in management systems. *10th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI)*. 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/COMSCI55378.2022.9912583

Надійшла (received) 24.01.26

Відомості про авторів / About the Authors

Луб Павло Миронович (Lub Pavlo Muronovych) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Ґжицького, м. Дубляни, Львівська обл., Україна; e-mail: pollylub@urk.net; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9600-0969.

Падюка Роман Іванович (Padyuka Roman Ivanovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Ґжицького, м. Дубляни, Львівська обл., Україна; e-mail: padyukaroman@gmail.com; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1542-2559.

Татомир Андрій Володимирович (Tatomyr Andriy Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, в.о. доцента кафедри інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Ґжицького, м. Дубляни, Львівська обл., Україна; e-mail: andrew.tatomyr@gmail.com; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2858-3597.

Заплатинський Назар Богданович (Zaplatynskyi Nazar Bogdanovych) – старший викладач кафедри інформаційних технологій Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Ґжицького, м. Дубляни, Львівська обл., Україна; e-mail: hayk.ukr@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7767-8795.

УДК 519.2 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.9

В. В. МОРОЗОВ, Р. Ю. КУЛИК

ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ПРИ УПРАВЛІННІ ВПЛИВАМИ ОТОЧЕННЯ ІТ-ПРОЄКТІВ В УМОВАХ ФІКСОВАНОГО БЮДЖЕТУВАННЯ

Досліджено методи прогнозування ризиків в управлінні фіксованобюджетними аутсорсинговими ІТ-проєктами з урахуванням нелінійної динаміки впливів зовнішнього середовища. Запропоновано інтеграційний підхід, що поєднує традиційні практики управління проєктами з сучасними методами прогнозування ризиків, включно зі статистичними моделями, аналізом часових рядів та симуляційними техніками. Проведено моделювання впливу ринкових коливань, технологічної невизначеності та регуляторних змін на ключові показники проєктів, зокрема терміни виконання, витрати та якість кінцевого продукту. Результати показали, що використання запропонованих методів прогнозування ризиків дозволяє підвищити точність планування бюджету та ресурсів, знизити ймовірність перевищення термінів і забезпечити стабільність виконання проєктних завдань. Запропоновані методи передбачають ідентифікацію потенційних ризиків, кількісну оцінку їх ймовірності та впливу, а також адаптацію плану управління проектом до змін зовнішнього середовища. На основі моделювання визначено пріоритети управлінських рішень та оптимальні стратегії реагування на непередбачувані фактори. Практична реалізація підходу дозволяє організаціям підвищити ефективність фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктів, зменшити фінансові втрати та поліпшити якість продукту з врахуванням умов змінного ринкового середовища. Стаття також окреслює перспективи подальших досліджень, включно з впровадженням машинного навчання та великих даних для підвищення точності прогнозування ризиків та автоматизації процесів управління складними ІТ-проєктами.

Ключові слова: управління проєктами, прогнозування ризиків, фіксованобюджетні проєкти, аутсорсинг, ІТ-проєкти, моделювання ризиків, планування ресурсів.

V. MOROZOV, R. KULYK

RISK FORECASTING IN THE MANAGEMENT OF EXTERNAL FACTORS AFFECTING IT PROJECTS UNDER A FIXED BUDGET

The study investigates project management methods and risk forecasting in fixed-budget IT outsourcing projects considering the nonlinear dynamics of the external environment. An integrated approach is proposed, combining traditional project management practices with modern risk forecasting techniques, including statistical models, time series analysis, and simulation methods. The research models the impact of market fluctuations, technological uncertainty, and regulatory changes on key project indicators, such as timelines, costs, and final product quality. Results demonstrate that risk forecasting enhances budget and resource planning accuracy, reduces the probability of schedule overruns, and ensures stability in project execution. The proposed methodology encompasses risk identification, quantitative assessment of probability and impact, and adaptation of the project management plan to environmental changes. Modeling outcomes define decision-making priorities and optimal response strategies to unforeseen factors. Practical implementation of this approach allows organizations to increase the efficiency of fixed-budget IT outsourcing projects, minimize financial losses, and improve product quality under variable market conditions. The study also outlines directions for future research, including the application of machine learning and big data to enhance risk forecasting accuracy and automate project management processes.

Keywords: project management, risk forecasting, fixed-budget projects, outsourcing, IT projects, risk modeling, resource planning.

Вступ. Сучасні інформаційні технології розвиваються швидкими темпами, що створює значні виклики для управління ІТ-проєктами, особливо у випадку фіксованобюджетних аутсорсингових контрактів. Підвищена конкуренція на ринку, технологічна невизначеність та динамічні зміни регуляторного середовища формують складне та нестабільне зовнішнє середовище, що безпосередньо впливає на ефективність виконання проєктів. У таких умовах класичні підходи до управління проєктами часто не забезпечують належної точності планування бюджету, ресурсів і термінів, а також не дозволяють своєчасно реагувати на непередбачувані ризики [1].

Проблема управління ризиками у фіксованобюджетних ІТ-проєктах набуває особливої актуальності, оскільки будь-яке відхилення від запланованих ресурсів чи термінів може призвести до фінансових втрат, зниження якості продукту та порушення договірних зобов'язань. Сучасні наукові дослідження вказують на необхідність інтеграції традиційних методів управління проєктами з передбачувальними моделями ризиків, що дозволяють враховувати нелінійні впливи зовнішнього середовища. Водночас існує недостатня кількість практично застосовних моделей, які поєднують прогнозування ризиків із управлінням фіксованобюджетними аутсорсинговими проєктами, що обмежує ефективність реалізації таких проєктів [2].

Наукове значення даної роботи полягає у розробці інтеграційного підходу до управління проектами в частині управління (прогнозування) ризиків, що дозволяє враховувати динамічні та нелінійні зміни зовнішнього оточення таких проєктів, а також у визначенні кількісних показників впливу ризиків на ключові параметри проєктів [3]. Практичне значення полягає у підвищенні точності планування бюджету і ресурсів, зниженні ймовірності перевищення термінів виконання завдань та забезпеченні стабільності роботи ІТ-компаній у складних умовах ринку [4].

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Управління ІТ-проєктами з фіксованим бюджетом є одним із найбільш складних напрямів проектної діяльності через високий рівень невизначеності

© В. В. Морозов, Р. Ю. Кулик, 2026

впливів зовнішнього середовища, що включає ринкову волатильність, технологічні зміни та регуляторні обмеження. У науковій літературі проблему управління ризиками у фіксованобюджетних проєктах почали активно досліджувати починаючи з початку XXI століття, акцентуючи увагу на інтеграції традиційних методів планування та контролю з прогнозуванням потенційних відхилень [5].

Класичні підходи до управління проектами, представлені у роботах [1] та [2], визначають стандартизовані процеси планування, моніторингу та контролю ресурсів, проте вони не враховують вплив нелінійних та динамічних зовнішніх факторів, що характерні для фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктів. Дослідження [6] приділяють увагу управлінню ризиками в проектній діяльності, пропонуючи методи ідентифікації та кількісної оцінки ризиків, проте їхні моделі переважно орієнтовані на класичні проєкти без обмежень бюджету або специфіки аутсорсингу.

У сучасних роботах [7] зосереджено увагу на адаптивних і гібридних підходах до управління проектами, які поєднують Agile та Waterfall для підвищення ефективності в умовах невизначеності. Проте навіть ці підходи не включають кількісне прогнозування ризиків з урахуванням нелінійних впливів зовнішнього середовища, що залишає невирішеною проблему інтеграції управління проектами та ризик-прогнозування у фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктах.

Останні дослідження у сфері математичного моделювання ризиків [8, 9] демонструють ефективність методів часових рядів, регресії та симуляцій для прогнозування нестабільних процесів. Водночас застосування цих методів у контексті фіксованобюджетних ІТ-проєктів є обмеженим, що створює потребу у розробці інтегрованих моделей, здатних одночасно враховувати бюджетні обмеження, часові рамки та динамічні ризики зовнішнього середовища [10].

Таким чином, наукові дослідження підтверджують актуальність проблеми, але залишають невирішеними ключові питання [11]:

- відсутність моделей, які інтегрують управління проектами та прогнозування ризиків у межах фіксованого бюджету;
- недостатня кількісна оцінка впливу зовнішніх нелінійних факторів на ефективність проекту;
- відсутність практичних методів адаптації плану проекту до динамічних змін середовища.

Дана стаття присвячена вирішенню цих прогалин через розробку інтегрованого підходу, який поєднує управління проектами та прогнозування ризиків, дозволяючи підвищити точність планування бюджету, ресурсів і термінів, а також стабільність виконання фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктів.

2. Мета статті. Метою даної статті є розробка методу інтегрованого управління фіксованобюджетними аутсорсинговими ІТ-проєктами з прогнозуванням ризиків, що виникають унаслідок впливу динамічних та нелінійних факторів зовнішнього середовища. До таких факторів належать ринкова волатильність, технологічна невизначеність, регуляторні зміни та інші непередбачувані події, здатні суттєво вплинути на терміни виконання, обсяг ресурсів та якість кінцевого продукту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

1. Ідентифікація та класифікація ризиків, які виникають у фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктах, з урахуванням специфіки зовнішнього середовища та особливостей взаємодії з замовником.
2. Кількісна оцінка впливу ризиків на ключові показники проекту, такі як терміни виконання, витрати та якість продукту, із застосуванням статистичних методів, регресійного аналізу, аналізу часових рядів та симуляційних моделей.
3. Розробка інтегрованої моделі управління проектом, яка поєднує планування та контроль ресурсів із прогнозуванням ризиків і дозволяє адаптувати план проекту до змін зовнішнього середовища.
4. Експериментальна перевірка ефективності запропонованого підходу, включно з моделюванням сценаріїв розвитку проекту та порівнянням результатів з класичними методами управління проектами без прогнозування ризиків.
5. Визначення практичних рекомендацій для підвищення ефективності управління фіксованобюджетними ІТ-проєктами, мінімізації фінансових втрат та підвищення якості продукту в умовах невизначеності.

Розв’язання цих завдань дозволяє не лише підвищити наукове розуміння механізмів впливу зовнішніх факторів на ефективність фіксованобюджетних проєктів, а й забезпечує практичну цінність для ІТ-компаній, що виконують проєкти на умовах жорсткого бюджету.

Таким чином, постановка завдання статті полягає у створенні методів, що забезпечують інтеграцію управління проектами та прогнозування ризиків у рамках фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктів, що дозволяє зменшити негативний вплив зовнішніх факторів та підвищити стабільність виконання проєктних завдань.

3. Виклад основного матеріалу. Для підвищення ефективності управління фіксованобюджетними аутсорсинговими ІТ-проєктами у роботі використано інтегрований підхід, що поєднує інструменти класичного проєктного менеджменту з методами кількісного прогнозування ризиків. Запропонована робота базується на поетапному аналізі зовнішнього середовища проєкту та формалізованій оцінці ризикових факторів, які впливають на бюджетні обмеження, строки виконання та якість кінцевого продукту.

Ключовою особливістю підходу є використання статистичних і прогнозних моделей для кількісного обґрунтування управлінських рішень, що дозволяє перейти від реактивного реагування на ризики до проактивного коригування параметрів проєкту. Отримані прогнози інтегруються в процеси планування, бюджетування та розподілу ресурсів, що забезпечує підвищення стійкості фіксованобюджетних IT-проєктів в умовах нелінійної динаміки зовнішнього середовища [12].

Для демонстрації ефективності запропонованого методу в даному дослідженні було використано тестові дані, отримані на основі аналізу п'яти існуючих фіксованобюджетних аутсорсингових IT-проєктів. Дані включали ключові показники проектів, такі як запланований бюджет, строки виконання, а також характерні ризики, що впливали на їхнє виконання. Проведено системний аналіз цих проектів з метою визначення ймовірності виникнення ризикових подій та оцінки їхнього потенційного впливу на бюджет і терміни.

На основі отриманих даних сформовано набір тестових сценаріїв, що імітують реальні умови проектної діяльності, включаючи технологічну невизначеність, ринкову волатильність та регуляторні зміни. Такий підхід дозволив не лише перевірити роботу методів прогнозування ризиків у практичних умовах, а й оцінити ефективність інтеграції прогнозування у процес управління проектами, визначити пріоритетні фактори ризиків та розробити рекомендації щодо оптимізації планування ресурсів і термінів [13].

Досліджувані проєкти A–E є прикладами реальних аутсорсингових IT-проєктів середнього масштабу, реалізованих у 2023–2025 роках у сфері розробки корпоративних інформаційних систем.

Статистичні дані, що характеризують тестовий набір сценаріїв, зведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичні дані

Проєкт	Бюджет (тис. $)	Терміни (дні)	Основний ризик	Ймовірність (%)	Вплив на бюджет (%)	Вплив на терміни (%)
A	100	90	Технологічна невизначеність	30	15	20
B	120	120	Ринкова волатильність	25	10	15
C	80	75	Регуляторні зміни	20	5	10
D	150	140	Технологічна невизначеність	35	20	25
E	200	180	Ринкова волатильність	30	15	15

Очікуваний вплив ризиків на бюджет проекту розраховується за формулою (1):

$$E = B_0 \cdot (1 + \sum_{i=1}^{n} R_i W_i) \quad (1)$$

де E – очікуваний бюджет з урахуванням ризиків;

B_0– запланований бюджет проекту;

R_i – ймовірність і-го ризику;

W_i – відносний коефіцієнт впливу і-го ризику (у частках одиниці);

n – кількість факторів ризику.

Запропонована форма моделей забезпечує узгодженість розмірностей показників та коректне масштабування відносних оцінок на базовий бюджет.

Вплив ризику складається з кількох складових:

- ΔT_i – очікуване збільшення тривалості проєкту (у відсотках)
- ΔC_i – очікуване зростання прямих витрат (у відсотках)
- ΔO_i – очікувані додаткові накладні або зовнішні витрати (у відсотках)

Тоді відносний вплив ризику (2):

$$W_i = \Delta T_i + \Delta C_i + \Delta O_i \quad (2)$$

Підставляємо це безпосередньо в основну модель (3) [18]:

$$E = B_0 \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{n} R_i \cdot (\Delta T_i + \Delta C_i + \Delta O_i)\right) (3)$$

де B_0 – початково затверджений бюджет проєкту

$R_i \in [0,1]$ – експертна або статистично оцінена ймовірність і-го ризику

ΔT_i – відносне збільшення витрат, пов'язане з порушенням графіка

ΔC_i – відносне збільшення прямих фінансових витрат

ΔO_i – відносні додаткові організаційні та зовнішні витрати

n – кількість ідентифікованих ризиків

де ΔT_i, ΔC_i , ΔO_i подано у частках одиниці та вони відображають відносне збільшення відповідних складових бюджету.

Запропонована форма моделі забезпечує узгодженість розмірностей показників, оскільки відносні оцінки впливу ризиків масштабуються на базовий бюджет проєкту.

Послідовність реалізації запропонованого методу [14]:

Запропонований метод прогнозування впливу ризиків у фіксованобюджетних аутсорсингових IT-проєктах реалізується як послідовність взаємопов'язаних етапів, що забезпечують перехід від якісної ідентифікації ризиків до кількісного прогнозування бюджетних відхилень.

На першому етапі здійснюється ідентифікація релевантних факторів ризику, характерних для конкретного проєкту. Формується перелік зовнішніх і внутрішніх ризиків, які потенційно можуть вплинути на строки виконання, обсяг ресурсів та фінансові обмеження.

На другому етапі виконується оцінка ймовірностей виникнення кожного ризику на основі

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

статистичних даних завершених проєктів або експертних оцінок. Результатом є кількісні значення, що характеризують частоту або шанс реалізації кожного з ідентифікованих ризиків.

Третій етап передбачає формування операційного впливу ризиків на бюджет проєкту. Для кожного ризику визначаються основні складові можливих фінансових втрат, пов'язані із затримками виконання, зростанням прямих витрат та додатковими накладними витратами. На основі цих складових формується інтегральний показник відносного впливу ризику.

На четвертому етапі здійснюється розрахунок очікуваного внеску окремого ризику у бюджетне відхилення шляхом поєднання оціненої ймовірності ризику та його відносного впливу з базовим бюджетом проєкту.

П'ятий етап полягає в агрегації впливів усіх ідентифікованих ризиків, що дозволяє отримати сумарне очікуване відхилення бюджету внаслідок реалізації сукупності ризикових факторів.

На шостому етапі визначається прогнозне значення бюджету проєкту з урахуванням ризиків, яке використовується для формування резервів бюджету та коригування планових показників.

Завершальним етапом є проведення імітаційного моделювання методом Монте-Карло, що дозволяє згенерувати множину можливих сценаріїв розвитку проєкту, оцінити розподіл імовірних бюджетних відхилень та визначити ймовірність виникнення критичних фінансових сценаріїв.

Для прогнозування динаміки ризиків використано методи експоненційного згладжування та імітаційне моделювання методом Монте-Карло, що дозволяє отримати емпіричні розподіли можливих перевищень бюджету та термінів виконання проєктів .

Для кожного проєкту було змодельовано по 1000 сценаріїв методом Монте-Карло, що загалом становить 5000 реалізацій. Розподіл результатів показано на рис. 1.

Рис. 1. Гістограма розподілу прогнозованих перевищень бюджету за результатами симуляцій Монте-Карло (5000 реалізацій)

Рис. 1 ілюструє результати імітаційного моделювання методом Монте-Карло, проведеного з метою прогнозування можливого перевищення бюджету у п'яти тестових фіксованобюджетних IT-аутсорсингових проєктах. Для кожного проєкту було змодельовано по 1000 альтернативних сценаріїв розвитку, що загалом становить 5000 реалізацій, у межах яких враховано ймовірність виникнення ключових ризиків, характерних для аутсорсингової IT-діяльності, а також величину їхнього потенційного впливу на бюджетні показники.

Отримані результати подано у вигляді гістограми емпіричного розподілу можливих відхилень фактичних витрат від запланованого бюджету, що дозволяє оцінити не лише середнє очікуване перевищення, а й імовірність виникнення критичних бюджетних сценаріїв. Аналіз такого розподілу створює підґрунтя для обґрунтованого формування фінансових резервів та вибору оптимальних стратегій управління ризиками в умовах невизначеності [14].

На рис. 1 відображено узагальнений розподіл можливих перевищень бюджету у відсотках від початкового плану, сформований на основі результатів моделювання. Аналіз отриманих даних показує, що [15]:

- проєкти A та D з високою ймовірністю технологічної невизначеності характеризуються найбільшим прогнозованим перевищенням бюджету;
- проєкти B та E із домінуванням ринкової волатильності мають середній рівень відхилень;

проєкт C демонструє найвищу стабільність бюджетного плану.

Отримана гістограма відображає емпіричний розподіл прогнозованих відхилень бюджету, що дозволяє оцінити ймовірність виникнення критичних фінансових сценаріїв та обґрунтувати розміри фінансових резервів.

Очікуване перевищення бюджету та термінів після інтеграції прогнозування ризиків зведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Очікуване перевищення бюджету та термінів після інтеграції прогнозування ризиків

Проєкт	Очікуване перевищення бюджету (%)	Очікуване перевищення термінів (%)
A	12	18
B	10	15
C	5	8
D	20	25
E	15	18

Аналіз результатів моделювання для окремих проєктів показав суттєві відмінності у характері бюджетних відхилень. Зокрема, для проєкту A та D, які характеризуються високою ймовірністю технологічної невизначеності (30 % та 35 % відповідно), спостерігається найбільше прогнозоване перевищення бюджету – 12 % та 20 %. Проєкти B та E, для яких домінує ризик ринкової волатильності, демонструють середній рівень перевищення бюджету – 10 % та 15 %. Водночас проєкт C, що має найнижчу ймовірність ризиків (20 %), характеризується

мінімальними відхиленнями бюджету (5 %) та строків виконання (8 %).

Результати моделювання показують [16]:

- інтеграція прогнозування ризиків дозволяє знизити ймовірність перевищення бюджету та термінів на 10–20 %;
- методи дозволяють визначати пріоритетні фактори ризиків і ефективно адаптувати план проекту;
- підвищується точність планування ресурсів та стабільність виконання проектних завдань.

Наукові результати та практичне значення:

1. Запропоновано інтегрований підхід, що поєднує управління проектами та кількісне прогнозування ризиків на основі тестових даних реальних проектів.

2. Показано, що математичне моделювання та симуляції Монте-Карло дозволяють кількісно оцінити вплив ризиків на бюджет та терміни.

3. Практичне застосування методів підвищує ефективність управління фіксованобюджетними аутсорсинговими ІТ-проєктами та забезпечує стабільність результатів проектної діяльності [17].

4. Обговорення результатів дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку. У результаті проведеного дослідження розглянуто проблему управління фіксованобюджетними аутсорсинговими ІТ-проєктами в умовах невизначеності та нелінійних впливів зовнішнього середовища. Запропоновано інтегрований підхід, що поєднує класичні методи управління проектами з інструментами прогнозування ризиків, орієнтованими на кількісну оцінку можливих відхилень бюджету і термінів виконання.

У ході аналізу встановлено, що традиційні підходи до управління фіксованобюджетними проєктами не забезпечують достатнього рівня адаптивності до динамічних змін зовнішнього середовища, зокрема ринкової волатильності, технологічної невизначеності та регуляторних змін. Це зумовлює необхідність використання прогнозних моделей, здатних враховувати стохастичний характер ризиків та їхній сукупний вплив на параметри проекту [18].

У межах дослідження розроблено модель оцінки очікуваного впливу ризиків, що базується на ймовірнісних характеристиках ризикових подій та їхньому впливі на бюджет проекту. Застосування методу симуляцій Монте-Карло на основі тестових даних з існуючих ІТ-аутсорсингових проєктів дозволило отримати розподіли можливих перевищень бюджету та оцінити межі допустимих фінансових відхилень. Результати моделювання підтвердили, що інтеграція прогнозування ризиків у процес управління проектами дає змогу підвищити обґрунтованість управлінських рішень і зменшити ймовірність критичних бюджетних перевищень.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованих методів під час планування та контролю фіксованобюджетних ІТ-проєктів, зокрема для формування резервів бюджету, вибору оптимальних стратегій управління ризиками та підвищення прозорості взаємодії між замовником і виконавцем [19].

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку пов’язані з розширенням набору факторів ризику та включенням до методів соціальних, організаційних і поведінкових аспектів управління проектами. Доцільним є також подальше вдосконалення прогнозних моделей шляхом використання методів машинного навчання та аналізу великих даних, а також адаптація запропонованого підходу до управління портфелями та програмами фіксованобюджетних ІТ-проєктів [20].

Висновки. У ході дослідження отримано такі основні результати відповідно до поставлених завдань:

1. За результатами ідентифікації та класифікації ризиків фіксованобюджетних аутсорсингових ІТ-проєктів встановлено, що найбільший вплив на перевищення бюджету та термінів виконання мають ризики технологічної невизначеності, ринкової волатильності та регуляторних змін. Визначено, що ці ризики мають нелінійний характер впливу та проявляються у вигляді накопичувального ефекту, який не враховується традиційними детермінованими моделями управління проектами.

2. У межах кількісної оцінки впливу ризиків розроблено модель очікуваного впливу ризикових подій на бюджет проекту, що враховує ймовірність виникнення кожного ризику та величину його фінансового впливу. Запропонована модель дозволяє отримувати прогнозні значення можливого перевищення бюджету у відсотковому вираженні та може бути використана на етапі планування проекту для формування фінансових резервів.

3. Для прогнозування сценаріїв розвитку проекту застосовано метод симуляцій Монте-Карло, який дозволив змоделювати розподіли можливих бюджетних відхилень на основі тестових даних з існуючих ІТ-аутсорсингових проєктів. Отримані результати показали, що середнє прогнозоване перевищення бюджету для досліджуваних проєктів становить від 5 % до 20 %, залежно від інтенсивності та поєднання ризиків, що підтверджує доцільність використання стохастичних методів при управлінні фіксованобюджетними проєктами.

4. У результаті інтеграції прогнозування ризиків у процес управління проєктами сформовано підхід, який забезпечує підвищення адаптивності планування та контролю проекту в умовах змінного зовнішнього середовища. Порівняння з традиційними методами управління показало, що використання прогнозних моделей зменшує ймовірність критичних перевищень бюджету та підвищує обґрунтованість управлінських рішень.

5. Практичне застосування запропонованих методів на тестових даних підтвердило їх

ефективність для підтримки прийняття управлінських рішень у фіксованобюджетних аутсорсингових IT-проєктах. Методи можуть бути використані керівниками проєктів для оцінки ризиків, коригування планів виконання та підвищення прозорості взаємодії між замовником і виконавцем.

Таким чином, у статті отримано науково обґрунтовані результати, які підтверджують доцільність поєднання управління проєктами та прогнозування ризиків у фіксованобюджетних аутсорсингових IT-проєктах і створюють підґрунтя для подальшого розвитку методів управління складними проектами в умовах невизначеності.

Список літератури

1. Kerzner H. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken: Wiley, 2017. 832 p.
2. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Newtown Square: Project Management Institute, 2021. 370 p.
3. Tomanek M., Juricek J. Project risk management model based on PRINCE2 and Scrum frameworks. *International Journal of Software Engineering & Applications.* 2015. Vol. 6, no. 1. P. 81–88. doi: 10.5121/ijsea.2015.6107
4. Taleb N. N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House, 2010. 444 p.
5. Williams T., Ackermann F., Eden C. Structuring complex projects: A framework for addressing uncertainty. *International Journal of Project Management*. 2010. Vol. 28, no. 8. P. 749–761. doi: 10.1016/j.ijproman.2010.07.003
6. Hillson D., Simon P. *Practical Project Risk Management: The ATOM Methodology*. Vienna: Management Concepts, 2012. 256 p.
7. Svejvig P., Andersen P. Hybrid project management: A systematic literature review. *International Journal of Project Management*. 2021. Vol. 39, no. 2. P. 144–161. doi: 10.1016/j.ijproman.2020.10.003
8. Morozov V., Deineha V., Yeremenko D. Development of energy consumption prediction models based on gradient descent methods. *IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. Astana, Kazakhstan, 2025. doi: 10.1109/SIST61657.2025.11139299
9. Serrador P. The impact of agile and hybrid project management approaches on project success. *Project Management Journal*. 2022. Vol. 53, no. 2. P. 158–172. doi: 10.1177/87569728211043502
10. Vose D. *Risk Analysis: A Quantitative Guide*. Chichester: Wiley, 2008. 752 p.
11. Kulyk R., Morozov V., Liakhovych H. Hybrid Risk Analysis Models: Integration of Machine Learning and Heuristic Methods. *IEEE IDAACS 2025: XIII International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. Gliwice, Poland, 4–6 Sep. 2025. Gliwice: Silesian University of Technology, 2025. URL: https://www.idaacs.net/storage/conferences/10/WTP/IDAACS_2025_Technical%20Programme_zoom_%28final%29.pdf.
12. Chapman C., Ward S. *How to Manage Project Opportunity and Risk*. Hoboken: Wiley, 2011. 392 p.
13. Ясинецький О. О., Фесенко Т. Г. Управління ризиками IT-проєктів: аналітичний огляд досліджень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. 2025. № 1 (10). С. 47–57. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/95600.
14. Strielkina A., Tetskyi A., Krasilshchykova V. Risk and uncertainty assessment in software project management: integrating decision trees and Monte Carlo modeling. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 3. P. 217–225. doi: 10.32620/reks.2023.3.17
15. Aaltonen K., Kujala J. Towards an improved understanding of stakeholder dynamics. *International Journal of Project Management*. 2016. Vol. 34, no. 8. P. 1537–1552. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.08.009
16. Гомозов Є., Мац В. Mathematical models of IT business risks assessment. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами*. 2024. № 1 (8). URL: https://pm.khpi.edu.ua/article/view/306780.
17. Leshchuk H. V. Simulyatsiynyi analiz Monte Carlo v systemi otsiniuvannia ryzykiv investytsiinykh proektiv. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky*. 2017. Vol. 2, no. 1. P. 57–67.
18. Boehm B., Turner R. *Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed*. Boston: Addison-Wesley, 2004. 336 p.
19. Hastie S., Wojewoda S. Standish Group 2015 Chaos Report – Q&A with Jennifer Lynch. *InfoQ*. 2015. Vol. 32, no. 4. P. 8–15. URL: https://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015/
20. Meyer W. G. *Quantifying risk: measuring the invisible*: conference paper. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2015. 25 p.

References (transliterated)

1. Kerzner H. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*. Hoboken, Wiley, 2017. 832 p.
2. Project Management Institute. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Newtown Square, Project Management Institute, 2021. 370 p.
3. Tomanek M., Juricek J. Project risk management model based on PRINCE2 and Scrum frameworks. *International Journal of Software Engineering & Applications*. 2015, vol. 6, no. 1, pp. 81–88. doi: 10.5121/ijsea.2015.6107
4. Taleb N. N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York, Random House, 2010. 444 p.
5. Williams T., Ackermann F., Eden C. Structuring complex projects: A framework for addressing uncertainty. *International Journal of Project Management*. 2010, vol. 28, no. 8, pp. 749–761. doi: 10.1016/j.ijproman.2010.07.003
6. Hillson D., Simon P. *Practical Project Risk Management: The ATOM Methodology*. Vienna, Management Concepts, 2012. 256 p.
7. Svejvig P., Andersen P. Hybrid project management: A systematic literature review. *International Journal of Project Management*. 2021, vol. 39, no. 2, pp. 144–161. doi: 10.1016/j.ijproman.2020.10.003
8. Morozov V., Deineha V., Yeremenko D. Development of energy consumption prediction models based on gradient descent methods. *IEEE 5th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. Astana, Kazakhstan, 2025. doi: 10.1109/SIST61657.2025.11139299
9. Serrador P. The impact of agile and hybrid project management approaches on project success. *Project Management Journal*. 2022, vol. 53, no. 2, pp. 158–172. doi: 10.1177/87569728211043502
10. Vose D. *Risk Analysis: A Quantitative Guide*. Chichester, Wiley, 2008. 752 p.
11. Kulyk R., Morozov V., Liakhovych H. Hybrid Risk Analysis Models: Integration of Machine Learning and Heuristic Methods. *IEEE IDAACS 2025: XIII International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (Gliwice, Poland, 4–6 Sep. 2025)*. Gliwice, Silesian University of Technology, 2025. Available at: https://www.idaacs.net/storage/conferences/10/WTP/IDAACS_2025_Technical%20Programme_zoom_%28final%29.pdf
12. Chapman C., Ward S. *How to Manage Project Opportunity and Risk*. Hoboken, Wiley, 2011. 392 p.
13. Yasinetskyi O. O., Fesenko T. H. Upravlinnya ryzykamy IT-proyektiv: analitychnyy ohlyad doslidzhen' [Risk management of IT projects: analytical review of research]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proyektamy* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2025, no. 1 (10), pp. 47–57. Available at: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/95600
14. Strielkina A., Tetskyi A., Krasilshchykova V. Risk and uncertainty assessment in software project management: integrating decision trees and Monte Carlo modeling. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023, no. 3, pp. 217–225. doi: 10.32620/reks.2023.3.17
15. Aaltonen K., Kujala J. Towards an improved understanding of stakeholder dynamics. *International Journal of Project*

Management. 2016, vol. 34, no. 8, pp. 1537–1552. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.08.009
16. Homozov Ye., Mats V. Mathematical models of IT business risks assessment. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proyektamy* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2024, no. 1 (8). Available at: https://pm.khpi.edu.ua/article/view/306780
17. Leshchuk H. V. Simulyatsiynyi analiz Monte Carlo v systemi otsiniuvannia ryzykiv investytsiinykh proektiv [Monte Carlo simulation analysis in the system of investment project risk assessment]. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky* [Ukrainian Journal of Applied Economics]. 2017, vol. 2, no. 1, pp. 57–67.
18. Boehm B., Turner R. *Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed*. Boston, Addison-Wesley, 2004. 336 p.
19. Hastie S., Wojewoda S. Standish Group 2015 Chaos Report – Q&A with Jennifer Lynch. *InfoQ*. 2015, vol. 32, no. 4, pp. 8–15. Available at: https://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015/
20. Meyer W. G. *Quantifying risk: measuring the invisible*. Newtown Square, PA, Project Management Institute, 2015. 25 p.

Надійшла (received) 24.02.26

.

Відомості про авторів / About the Authors

Морозов Віктор Володимирович (Morozov Viktor) – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій управління, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна; email: knumvv@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7946-0832.

Кулик Роман Юрійович (Kulyk Roman) – аспірант факультету інформаційних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна; email: rom.kulyk@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7613-7532.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

УДК 004.4.519.816 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.10

В. Є. СОКОЛ, М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, Д. К. МАЛЕЦЬ, К. О. АФАНАСЬЄВ

ВЕРБАЛЬНИЙ ОПИС ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАНУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Зазначено, що для вирішення задачі розробки інформаційної технології планування підвищення рівня якості процесу розробки програмного забезпечення (ПР ПЗ) на основі кількісних шкал моделей зрілості попередньо необхідно на вербальному рівні розробити технологію, яка складається з окремих етапів, вирішення поставленої проблеми. На першому етапі технології проводиться формалізація структури ПР ПЗ та оцінка його якості на основі бальних якісних шкал моделей зрілості Capability Maturity Model Integration (CMMI) та Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE). На другому етапі визначені основні недоліки використання бальних якісних шкал і запропоновано метод синтезу збалансованих кількісних шкал на основі використання функції корисності. На третьому етапі технології проводиться оцінка якості окремих складових ПР ПЗ на основі збалансованих шкал моделей зрілості CMMI та SPICE. На четвертому етапі кількісні шкали використовуються для синтезу динамічних моделей планування підвищення якості множини фокусних областей моделі CMMI та процесів моделі SPICE. П'ятий етап присвячено використанню алгоритму «Київський віник», який дозволяє вирішити задачу планування підвищення якості ПР ПЗ. На шостому етапі розглядаються основні складові прикладної інформаційної технології, у тому числі архітектурний синтез системи, яка повинна реалізувати розроблені моделі, методи та алгоритми. Сьомий та восьмий етапи присвячені параметричному аналізу та формуванню ефективних рішень, на основі яких особа, що приймає рішення, визначає варіант розвитку ПР ПЗ. Наведено шляхи подальших досліджень, у тому числі: розробка статичних моделей планування підвищення якості ПР ПЗ на основі кількісних збалансованих шкал моделей зрілості; розробка прикладної інформаційної технології ковзного планування на основі статичних та динамічних моделей зрілості.

Ключові слова: кількісні шкали, динамічна модель, оптимізація, метод послідовного аналізу варіантів, обмеженість ресурсів, архітектурний аналіз, прикладна інформаційна технологія.

V. SOKOL, M. GODLEVSKYI, D. MALETS, K. AFANASIEV

A VERBAL DESCRIPTION OF THE TECHNOLOGY FOR PLANNING THE IMPROVEMENT OF THE QUALITY OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS

It is noted that to solve the problem of developing information technology for planning the improvement of the quality of the software development process (SDP) based on quantitative scales of maturity models, firstly, it is necessary to develop a technology at the verbal level that consists of separate stages for solving the problem at hand. At the first stage of the technology, the structure of the SP is formalised and its quality is assessed based on the point-based qualitative scales of the Capability Maturity Model Integration (CMMI) and Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE) maturity models. The second stage identifies the main shortcomings of using qualitative point scales and proposes a method for synthesising balanced quantitative scales based on the use of utility functions. The third stage of the technology involves assessing the quality of individual components of the software development process based on balanced scales of CMMI and SPICE maturity models. At the fourth stage, quantitative scales are used to synthesise dynamic models for planning quality improvement in a set of focus areas of the CMMI model and SPICE model processes. The fifth stage is devoted to the use of the 'Kyiv broom' algorithm, which allows solving the problem of planning software quality improvement. The sixth stage considers the main components of applied information technology, including the architectural synthesis of the system that should implement the developed models, methods, and algorithms. The seventh and eighth stages are devoted to parametric analysis and the formation of effective solutions, on the basis of which the decision-maker determines the development option for the software product. The ways for further research are presented, including: the development of static models for planning the improvement of software development quality based on quantitative balanced scales of maturity models; the development of applied information technology for sliding planning based on static and dynamic maturity models.

Keywords: quantitative scales, dynamic model, optimisation, sequential analysis method, resource constraints, architectural analysis, applied information technology.

Вступ. На теперішній час у науковій літературі розглядається багато підходів до оцінки рівня якості процесу розробки програмного забезпечення (ПР ПЗ), але найбільш популярні і широко використовуються на практиці моделі зрілості, такі як Capability Maturity Model Integration (CMMI) та Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE) [1–4]. Модель SPICE відповідає стандарту ISO/IEC 15504 TR, а модель CMMI була розроблена Інститутом програмної інженерії (Software Engineering Institute, SEI) на основі моделі Capability Maturity Model (CMM). Ці моделі базуються на концепції зрілості організації, яка розробляє програмні системи. Поняття зрілості є комплексним і визначається на основі багатьох складових, таких як ступень: виміру, управління, контролю та виконання ПР ПЗ. Рівень зрілості дозволяє опосередковано визначити можливість розробки кожного проєкту у задані терміни з досягненням поставлених перед ним цілей.

Моделі зрілості CMMI та SPICE реалізують безперервний варіант до оцінки якості ПР ПЗ, який визначає якість окремих процесних областей. Кожна процесна (фокусна) область моделі CMMI має чотири рівні можливості (0, 1, 2, 3), а процесна область моделі SPICE – п'ять рівнів (1, 2, 3, 4, 5). Крім цього, модель CMMI реалізує дискретний варіант оцінки якості всього ПР ПЗ на основі п'яти рівнів зрілості, кожен з яких складається з множини процесних (фокусних) областей. Кожна процесна область (Key Process Area, KPA) визначає досягнення множини цілей, важливих для підвищення якості ПР ПЗ. Цілі бувають двох типів: загальні і особисті. Особисті цілі належать конкретним процесним областям, а загальні можуть з'являтися у декількох процесних областях. Множини

© В. Є. Сокол, М. Д. Годлевський, Д. К. Малець, К. О. Афанасьєв, 2026

практик (Key Practice, KP) визначають дії, необхідні для досягнення цілей процесної області [5].

Одними з основних задач програмної інженерії є оцінка і у подальшому підвищення якості ПР ПЗ в умовах обмежених ресурсів. Для вирішення цих задач попередньо розробляється план програми удосконалення ПР ПЗ. Це дозволяє керівництву IT-компанії визначити стратегію підвищення її зрілості.

Постановка та мета задачі дослідження. Аналіз досліджень, які наведено у роботах [5–7] щодо розробки інформаційних технологій планування підвищення якості ПР ПЗ показав, що всі вони базуються на використанні якісних бальних шкал першого типу оцінки якості окремих фокусних областей безперервної моделі CMMI та всього ПР ПЗ на основі дискретної моделі CMMI, а також окремих процесів моделі SPICE. Основний недолік такого підходу є в тому, що синтезовані математичні моделі планування підвищення якості ПР ПЗ, які використовують змінні з такими шкалами, не дозволяють адекватно відобразити підвищення якості ПР ПЗ з погляду корисності використання фінансових ресурсів. Це пов'язано з тим, що існуючі вербальні моделі зрілості CMMI та SPICE [1–4] при підвищенні рівнів можливості або рівнів зрілості на одну градацію шкали (на один бал) дають різне підвищення якості ПР ПЗ з погляду корисності. Наприклад, підвищення рівня зрілості всього ПР ПЗ з другого на третій рівень з погляду корисності ПР ПЗ не відповідає підвищенню рівня зрілості з третього на четвертий рівень, хоча в першому та другому випадках рівень зрілості підвищується на один бал. Такі обставини спонукали необхідність перетворення бальних якісних шкал моделей зрілості у кількісні збалансовані шкали для синтезу моделей планування підвищення якості ПР ПЗ, в яких кожна градація шкали змінних відповідає певному підвищенню рівня якості окремої фокусної області та процесу, а також всього ПР ПЗ з погляду корисності їх використання. Задача планування підвищення якості окремих множин фокусних областей та процесів моделей CMMI та SPICE у роботі розглядається на деякому плановому періоді та реалізується шляхом технології ковзного планування. Суть такого підходу базується на тому, що спочатку вирішується динамічна задача на всьому плановому періоді і формується траєкторія, яка визначає стани ПР ПЗ на кожному підперіоді планування. Далі синтезується статична модель та вирішується статична постановка задачі, цільовим профайлом якої є стан ПР ПЗ у кінці першого підперіоду планування. Для статичної постановки задачі час не є змінною моделі і тому її можна синтезувати на основі більш детального розгляду. Це значить, що статична модель є більш адекватною об'єкту дослідження і уточнює результати вирішення більш грубої динамічної задачі, але яка розглядає поставлену задачу на всьому плановому періоді. Отже, організується ітераційний процес почергового вирішення динамічної та статичної постановки задачі. На кожній ітерації весь період планування зміщується на один підперіод і знову вирішується динамічна задача з новим початковим станом ПР ПЗ, який є результатом вирішення статичної задачі і новим цільовим профайлом кінця нового планового періоду, і т. ін. На рис. 1 наведена наочна інтерпретація технології ковзного планування, Σ_i, $i=\overline{0,T+S}$ – простори, в яких визначаються стани ПР ПЗ, χ_t^j, $t=\overline{j,T+j}$, $j=\overline{0,S}$ – конкретні стани ПР ПЗ на t-му підперіоді планування та j-му кроці, S – останній крок планування, який розглядається.

Використаємо рис. 1 для більш детального розгляду технології ковзного планування. У результаті вирішення динамічної задачі на нульовому кроці ітераційного процесу з початковим станом ПР ПЗ χ_0^0 та

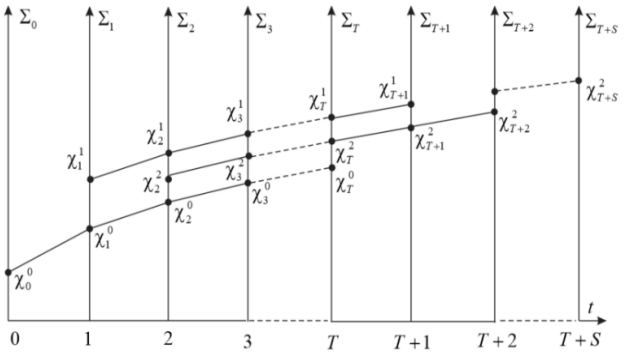

Рис. 1. Технологія ковзного планування

цільовим профайлом χ_T^0 отримуємо траєкторію $\left\{\chi_0^0,\chi_1^0,\chi_2^0,\ldots\chi_T^0\right\}$. Стан χ_1^0 є цільовим профайлом для статичної задачі, в результаті вирішення якої корегується стан χ_1^0 на χ_1^1, який є новим початковим станом ПР ПЗ для вирішення динамічної постановки задачі з новим цільовим профайлом χ_{T+1}^1 ПР ПЗ вже на $T+1$-му підперіоді планування. В результаті на першій ітерації отримуємо нову траєкторію $\left\{\chi_1^1,\chi_2^1,\chi_3^1,\ldots\chi_{T+1}^1\right\}$ і цільовий профайл χ_2^1 для наступної статичної постановки задачі і т. ін. У роботі розглядається тільки динамічна постановка задачі на основі сформованих кількісних шкал моделей зрілості. Синтез статичної моделі задачі на основі кількісних шкал є предметом подальших досліджень. З метою вирішення динамічної задачі планування підвищення рівня якості ПР ПЗ на основі сформованих кількісних шкал моделей зрілості спочатку розглянемо цю проблему на вербальному рівні у вигляді технології, яка складається з послідовності окремих етапів її реалізації з можливістю використання зворотного зв'язку на більшості етапів.

Вербальний опис технології. На рис. 2 наведено технологію підвищення рівня якості ПР ПЗ на основі кількісних шкал моделей зрілості CMMI та SPICE. Розглянемо окремо її основні етапи.

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

Рис. 2. Технологія планування підвищення якості ПР ПЗ ІТ-компанії

Етап 1. Якість ПР ПЗ ІТ-компанії це комплексне поняття, яке синтезоване з багатьох окремих складових. Тому виникає проблема декомпозиції цього поняття на окремі більш прості складові з метою оцінки їхньої якості. Така декомпозиція залежить від моделей оцінки якості ПР ПЗ. У роботі як приклад розглядаються дві моделі: CMMI та SPICE. Для цих моделей необхідно провести декомпозицію до рівня окремих об'єктів, які характеризують ту чи іншу складову якості ПР ПЗ. Для моделі CMMI це категорії фокусних областей і далі окремі фокусні області, а для моделі SPICE – категорії процесів, які декомпозуються на окремі процеси.

Далі виникає питання подальшої декомпозиції цих об'єктів до рівня можливості їх формалізації шляхом введення окремих змінних, які характеризують їхню якість. Наприклад, кожна фокусна область декомпозується на окремі цілі, а кожна ціль – на окремі практики, для яких вводяться дискретні змінні «рівня можливості» практик від 0 до 3. Кожній змінній відповідає бальна якісна шкала першого типу і кожен бал вербально описується. Далі реалізується агрегація окремих практик і визначається оцінка якості окремих фокусних областей також на основі бальних якісних шкал першого типу [8].

Аналогічно окремий процес моделі SPICE декомпозується на окремі практики, «рівні можливості» яких визначаються на основі дев’яти атрибутів, кожен з яких характеризується чотирма рівнями «володіння рисою». Саме на цьому рівні вводяться змінні з бальною шкалою від 1 до 4. На основі цих змінних формується бальна шкала рівнів можливості практик від 1 до 5. Далі, як і в моделі CMMI, реалізується агрегація окремих практик і визначається оцінка якості процесів моделі SPICE [8].

З метою оцінки якості всього ПР ПЗ ІТ-компанії виникає задача агрегації отриманих оцінок якості окремих складових моделей. Цей процес агрегації задокументовано для моделі CMMI при її дискретному варіанті реалізації, де визначається п'ять

рівнів зрілості ПР ПЗ. Перший рівень відповідає будь-якому ПР ПЗ, який реалізує розробку ПЗ. Кожен з інших рівнів зрілості визначається фіксованою множиною фокусних областей, кожна з яких має заданий рівень можливості. Отже, модель CMMI реалізує свій дискретний варіант, для якого використовується бальна якісна шкала першого типу з градаціями від 1 до 5 [8].

Модель SPICE на теперішній час не має офіційного дискретного варіанта і тому агрегація її окремих складових може проводитись на прикладі (за аналогією) моделі CMMI або іншим чином.

Етап 2. Оцінка якості окремих складових ПР ПЗ та всього ПР ПЗ на основі моделей зрілості, які базуються на бальних якісних шкалах першого типу, не дозволяє кількісно визначити рівень їхньої зрілості. Вербальний опис моделей CMMI та SPICE вирішує тільки питання якісної оцінки ПР ПЗ, а це в свою чергу не дозволяє синтезувати моделі планування розвитку ПР ПЗ (підвищення його спроможності). Як було сказано вище, це пов'язано з тим, що кожна градація бальної шкали не відповідає деякій конкретній величині корисності ПР ПЗ і підвищення зрілості всього ПР ПЗ або його складових на один бал не дозволяє визначити їхню нову корисність кількісно. Тому виникає необхідність розробки технології перетворення бальної якісної шкали у кількісну за допомогою використання теорії корисності.

Ідея такого підходу в тому, що за допомогою експертів визначається на скільки підвищується корисність ПР ПЗ або його окремих складових з кожним балом якісної шкали. Реалізація такого підходу базується на методі парних порівнянь Сааті [9, 10]. Для більш адекватної оцінки об'єкта дослідження запропоновано використовувати методологію колективного експертного оцінювання (МКЕО) [10]. Може так статися, що підвищення якості ПР ПЗ на один бал (наприклад, з трьох до чотирьох та з чотирьох до п'яти) призводить до доволі різних за величиною приростів функції корисності. Тому за аналогією зі збалансованими шкалами парних порівнянь введено поняття збалансованої кількісної шкали безпосередньої оцінки об'єктів. Суть такого підходу в тому, щоб окремі градації такої кількісної шкали були розташовані приблизно на однаковій відстані [11, 12].

Етап 3. Кожна фокусна область моделі CMMI та процес моделі SPICE визначаються на основі реалізації окремих множин практик, які долучені до них. У свою чергу кожна практика має деякий «рівень можливості», залежно від яких визначається «рівень можливості» фокусної області та процесу. У свою чергу для підвищення «рівня можливості» практик необхідно використання фінансових ресурсів. Отже, кожному «рівню можливості» відповідають необхідні ресурси. Підкреслимо, що при послідовному досягненні першого, другого та третього «рівнів можливості» фокусної області та з другого по п'ятий для процесів необхідні ресурси відрізняються від тих, які необхідні при переході за один крок з нульового рівня на третій чи з першого на п'ятий в напрямку їх збільшення. Тому у подальшому для кожної фокусної області або процесу розглядаються різні варіанти досягнення більш високого «рівня можливості».

Відповідно до технології перетворення бальних якісних шкал першого типу у кількісні кожному варіанту використання фінансових ресурсів буде відповідати конкретне значення функції корисності. В результаті ми отримаємо підхід до оцінки якості окремих фокусних областей та процесів моделей зрілості на основі кількісних шкал.

Розглянемо питання підвищення якості всього ПР ПЗ на основі кількісних шкал на прикладі моделі CMMI, яка має, крім безперервного, ще і дискретний варіант реалізації. Як і для окремих фокусних областей та процесів реалізується перетворення п'ятибальної якісної шкали зрілості ПР ПЗ у кількісну шкалу за допомогою парних порівнянь Сааті. В результаті ми отримаємо кількісну шкалу оцінки якості всього ПР ПЗ.

Фактично це дозволяє визначити значення функції корисності для кожного рівня зрілості ПР ПЗ залежно від фінансових ресурсів, які використовуються для підняття «рівня можливості» окремих фокусних областей. Залежно від варіантів підвищення «рівнів можливості» фокусних областей, які відповідають конкретному рівню зрілості, виникає потреба у різних фінансових ресурсах, які забезпечують шуканий рівень зрілості.

Етап 4. Синтез моделі динамічної задачі планування покращення якості ПР ПЗ розглядається на прикладі множини фокусних областей моделі CMMI. У якості цільової функції моделі визначається величина приросту функції корисності на всьому плановому періоді з урахуванням обмежень на фінансові ресурси на кожному підперіоді і всьому періоді планування. Функція корисності i-ї фокусної області k-ї категорії у t-му підперіоді планування $P^{ik}(t)$ є дискретною змінною, яка на інтервалі $(0,1]$ приймає чотири базових значення: $P_0^{ik}, P_1^{ik}, P_2^{ik}, P_3^{ik}$, де $P_3^{ik}=1$ по визначенню. Отже, $P^{ik}(t)\in\left\{P_0^{ik}, P_1^{ik}, P_2^{ik}, P_3^{ik}\right\}$. Приріст функції корисності для кожної фокусної області моделі CMMI або процесу моделі SPICE може відбуватися різним шляхом при переході від одного рівня можливості до більш потужного (не обов'язково наступного). Кожному варіанту підвищення рівня можливості, а значить і функції корисності, фокусної області (процесу) відповідають деякі ресурси R_{jl}^{ik} для переходу з j-го на l-й рівень можливості.

Синтез цільової функції моделі відбувається шляхом згортки приростів множини функцій корисності окремих фокусних областей або процесів з урахуванням вагових коефіцієнтів їх важливості. Зважаючи на те, що розглядається динамічна постановка задачі, при побудові цільової функції

моделі визначаються вагові коефіцієнти важливості для кожного підперіоду планування. При формуванні ресурсних (фінансових) обмежень на цільову функцію моделі виникає питання визначення управляючих змінних, які забезпечують залежність між варіантом приросту функції корисності фокусної області (процесу) і необхідними для цього ресурсами. Один з підходів до вирішення цієї проблеми – використання булевих змінних $\left\{x_l^{ik}(t)\right\}$, де l – рівень можливості, а t – підперіод планування. В результаті формується модель задачі з адитивною цільовою функцією та булевими змінними, на яку накладаються ресурсні обмеження. Ресурси виділяються на кожному підперіоді планування і можуть бути перенесені на наступні підперіоди.

Етап 5. Аналіз динамічної моделі планування підвищення якості множини фокусних областей моделі CMMI (процесів моделі SPICE) показав, що найбільш сприятливим методом до її розв'язання є метод послідовного аналізу варантів (ПАВ). Такий висновок зроблено на основі того, що: 1) модель має адитивну цільову функцію з булевими змінними; 2) обмеження визначаються на основі функцій з квадратичними булевими змінними.

В результаті задача є NP-складною і використання реальної інформації призводить до дуже високої розмірності задачі і недоцільності використання інших методів для такого класу задач. Метод ПАВ є багатокроковим процесом, на кожному кроці якого визначається множина неконкурентоздатних варіантів, що не входять в оптимальне рішення. Це дозволяє вирішувати такої складності задачі, які не підсильні іншим методам. У роботі запропоновано використовувати алгоритм «Київський віник», розроблений українськими вченими В. С. Михалевичем та Н. З. Шором на основі методу ПАВ. Наочна інтерпретація цього алгоритму на нульовому кроці технології ковзного планування наведена на рис. 3. Множини $G_0, G_1 ... G_T$ визначаються на основі ресурсних (фінансових) обмежень моделі. Множина G_0 складається з одного елементу і визначає початковий стан підмножини фокусних областей моделі CMMI або процесів моделі SPICE.

Етап 6. Упродовж розробки інформаційної технології планування підвищення якості підмножини окремих складових моделей зрілості вирішуються наступні задачі: 1) використання стандарту IDEF для представлення технології у вигляді послідовності бізнес-процесів; 2) визначення функціональних та нефункціональних вимог до ПЗ; 3) формування діаграми використання ПЗ; 4) формування моделі даних; 5) аналіз та обґрунтування інструментарію для розробки ПЗ; 6) вибір архітектури ПЗ; 7) визначення та представлення програмних компонентів діаграми розгортання; 8) формування тестових прикладів і перевірка на їхній основі працездатності інформаційної технології.

Етап 7. Параметричний аналіз моделей планування підвищення рівня якості ПР ПЗ на основі множини окремих складових моделей зрілості пропонується проводити шляхом варіювання ряду параметрів моделей. Це дозволяє особі, що приймає рішення (ОПР) сформувати множину альтернатив для прийняття остаточного рішення. Варіювання параметрів проводиться в межах заздалегідь заданих інтервалів з урахуванням: впливу зовнішнього середовища; предметної області використання ПР ПЗ; варіанта планування (поточне, середньострокове, стратегічне) і т. ін.

Враховуючи технологію побудови моделей до параметрів, які доцільно дослідити, відносяться: коефіцієнти важливості окремих складових моделей зрілості; довжина періоду планування і кількість підперіодів на ньому; коефіцієнти важливості окремих підперіодів планування; обмеження на фінансові ресурси по кожному підперіоду планування; загальні фінансові ресурси впродовж усього періоду планування.

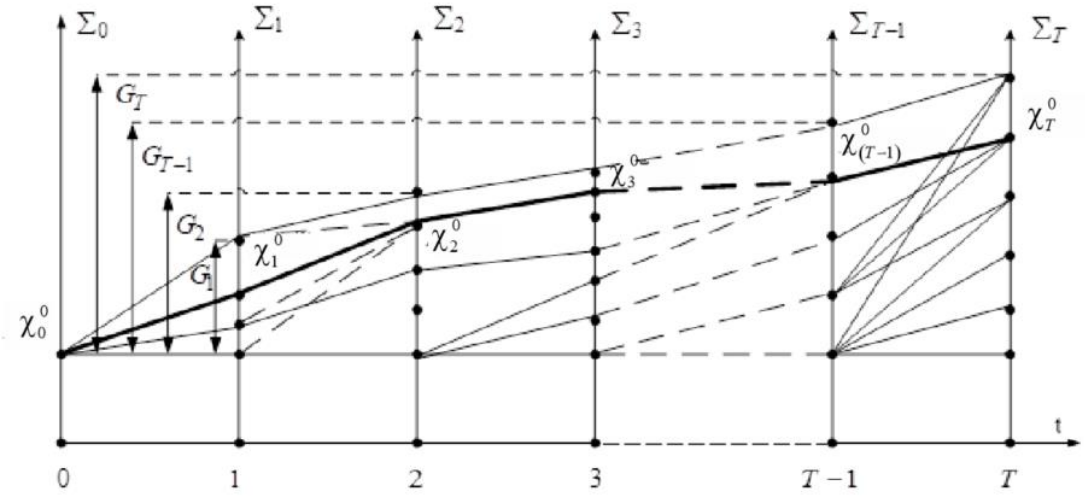

Рис. 3. Наочна інтерпретація алгоритму «Київський віник»

Етап 8. На основі варіювання параметрів моделі ОПР отримує множину альтернативних варіантів, з яких необхідно обрати остаточне рішення для втілення його у практику функціонування ІТ-компанії. Вибір раціональної альтернативи реалізується на основі оцінки трьох груп критеріїв, які є показниками ефективності функціонування ПР ПЗ. До першої групи входить ступінь досягнення поставленої мети. В нашому випадку метою є цільовий профайл, який визначає якість множини окремих складових моделі зрілості. В цю групу також входить приріст функції корисності протягом усього планового періоду. До другої групи входять необхідні ресурси для досягнення поставленої мети. Третя група визначає довжину періоду (часу) досягнення поставленої мети. На основі оцінки визначених критеріїв вибирається множина ефективних альтернатив, з яких ОПР на основі додаткової інформації визначає кращий варіант.

Висновки, шляхи подальших досліджень. У роботі підкреслено, що для вирішення задачі розробки моделей, методів та інформаційної технології планування підвищення рівня якості ПР ПЗ на основі кількісних шкал моделей зрілості попередньо необхідно на вербальному рівні розробити технологію, яка складається з окремих етапів, вирішення поставленої проблеми. В результаті на першому етапі проводиться формалізація структури та оцінка якості ПР ПЗ на основі бальних якісних шкал моделей зрілості CMMI та SPICE. Далі на другому етапі визначені основні недоліки використання бальних якісних шкал і запропоновано метод синтезу збалансованих кількісних шкал на основі використання функції корисності. На третьому етапі технології проводиться оцінка якості окремих складових ПР ПЗ на основі збалансованих кількісних шкал. На четвертому етапі кількісні шкали моделей зрілості використовуються для синтезу моделей планування підвищення якості множин окремих складових ПР ПЗ. Далі етап 5 присвячено алгоритму «Київський віник», який відноситься до методу ПАВ і дозволяє вирішити задачу планування підвищення якості ПР ПЗ. На шостому етапі розглядаються основні складові інформаційної технології, яка повинна реалізувати розроблені моделі, методи та алгоритми. На сьомому та восьмому етапах ОПР на основі параметричного аналізу та формування ефективних рішень визначає варіант розвитку ПР ПЗ, який може бути прийнятим до впровадження.

Напрямки подальших досліджень:

1) розробка динамічних моделей планування підвищення якості ПР ПЗ ІТ-компанії для дискретного варіанта моделей зрілості;

2) розробка статичних моделей планування підвищення якості ПР ПЗ на основі кількісних збалансованих шкал;

3) розробка інформаційної технології ковзного планування підвищення якості ПР ПЗ на основі статичних та динамічних моделей зрілості.

Список літератури

1. Chrissis M. B., Konrad M., Shrum S. *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement.* Addison-Wesley, 2003. 688 p.
2. Андон Ф. И., Коваль Г. И., Коротун Т. М. *Основы инженерии качества программных систем.* 2е издание. К: Академпериодика, 2007. 672 с.
3. Mutafelija B., Stromberg H. *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards.* Boca Raton: Auerbach Pubs, 2009. 406 p.
4. Mesquida Antoni, Mas Antònia, Alcover Amengual, Calvo-Manzano Jose. IT Service Management Process Improvement based on ISO/IEC 15504: A systematic review. *Information & Software Technology.* 2012. Vol. 5, pp. 239–247.
5. Годлевский М. Д., Брагинский И. Л. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости. *Проблемы информационных технологий.* Херсон: ОЛДИ-Плюс, 2012. С. 6–13.
6. Годлевский М. Д., Голоскокова А. А. Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Східно–Європейський журнал передових технологій.* Харків, 2015. № 3/2 (75). С. 23–29. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43003
7. Годлевський М. Д., Голоскокова А. О., Бурлаков Г. О. Динамічна модель планування розвитку підмножини процесів еталонної моделі зрілості SPICE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології.* Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 10–16. https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.02.02
8. Сокол В. Є., Годлевский М. Д., Малець Д. К. Оцінка якості процесу розробки програмного забезпечення ІТ-компанії на основі використання функції корисності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології.* Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 1 (11). С. 9–17. https://doi.org/10.20998/2079-0023.2024.01.02
9. Сокол В. Є., Годлевский М. Д., Малець Д. К., Афанасьєв К. О. Синтез кількісних шкал моделей зрілості для оцінки якості процесу розробки програмного забезпечення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології.* Харків: НТУ «ХПІ», 2025. № 2 (14). С. 122–128.
10. Крючковский В. В., Петров Э. Г., Соколова Н. А., Ходаков В. Е. *Интроспективный анализ. Методы и средства экспертного оценивания.* Херсон: Гринь Д. С., 2011. 168 с.
11. Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis.* 1997. Vol. 6, pp. 309–319.
12. Lootsma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research.* 1989. Vol. 40, pp. 109–116.

References (transliterated)

1. Chrissis M. B., Konrad M., Shrum S. *CMMI: Guidelines for Process Integration and Product Improvement*. Addison-Wesley Publ., 2003. 688 p.
2. Andon F. I., Koval' G. I., Korotun T. M. *Osnovy inzhenerii kachestva programmnykh sistem. 2-e izd.* [Fundamentals of software systems quality engineering. 2nd ed.]. Kyiv, Akademperiodika Publ., 2007. 672 p.
3. Mutafelija B., Stromberg H. *Process improvement with CMMI v1.2 and ISO standards*. Boca Raton, Auerbach Publ., 2009. 406 p.
4. Mesquida A., Mas A., Alcover A., Calvo Manzano J. IT Service Management Process Improvement based on ISO/IEC 15504: A systematic review. *Information & Software Technology*. 2012, vol. 5, pp. 239–247.
5. Godlevskiy M. D., Braginskiy I. L. Dinamicheskaya model' i algoritm upravleniya kachestvom protsessa razrabotki programmnykh sistem na osnove modeli zrelosti [Dynamic model and algorithm for quality management of the software systems development process based on a maturity model]. *Problemy*

informatsionnykh tekhnologiy [Problems of Information Technologies]. Kherson, OLDI-Plyus Publ., 2012, pp. 6–13.
6. Godlevskiy M. D., Goloskokova A. A. Sintez staticheskikh modeley planirovaniya uluchsheniya kachestva protsessa razrabotki programmnogo obespecheniya [Synthesis of static planning models for improving the quality of the software development process]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. Kharkiv, 2015, no. 3/2 (75), pp. 23–29. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43003
7. Hodlevs'kyy M. D., Holoskokova A. O., Burlakov H. O. Dynamichna model' planuvannya rozvytku pidmnozhyny protsesiv etalonnoyi modeli zrilosti SPICE [Dynamic model for planning the development of a subset of processes of the SPICE maturity reference model]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 10–16. doi: 10.20998/2079-0023.2020.02.02
8. Sokol V. Ye., Godlevskiy M. D., Malets D. K. Otsinka yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya IT-kompaniyi na osnovi vykorystannya funktsiyi korysnosti [Quality assessment of the software development process of an IT company based on the use of the utility function]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1 (11), pp. 9–17. doi: 10.20998/2079-0023.2024.01.02
9. Sokol V. Ye., Godlevskiy M. D., Malets D. K., Afanas'yev K. O. Syntez kil'kisnykh shkal modeley zrilosti dlya otsinky yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya [Synthesis of quantitative scales of maturity models for assessing the quality of the software development process]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi* [Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025, no. 2 (14), pp. 122–128.
10. Kryuchkovskiy V. V., Petrov E. G., Sokolova N. A., Khodakov V. E. *Introspektivnyy analiz. Metody i sredstva ekspertnogo otsenivaniya* [Introspective analysis. Methods and tools of expert evaluation]. Kherson, Grin' D. S. Publ., 2011. 168 p.
11. Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997, vol. 6, pp. 309–319.
12. Lootsma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989, vol. 40, pp. 109–116.

Надійшла (received) 24.02.26

Відомості про авторів / About the Authors

Сокол Володимир Євгенович (Sokol Volodymyr) – доктор філософії (PhD), доцент, науковий дослідник дослідницької групи з навчальних технологій, Рейнсько-Вестфальський Технічний Університет, м. Ахен, Німеччина, e-mail: sokol@cs.rwth-aachen.de; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4689-3356.

Годлевський Михайло Дмитрович (Godlevskyi Mykhailo) – доктор технічних наук, професор, директор інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Mykhailo.Hodlevskyi@khpi.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2872-0598.

Малець Дмитро Костянтинович (Malets Dmytro) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: dmytro.malets@cs.khpi.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1980-1401.

Афанасьєв Костянтин Олексійович (Afanasiev Kostiantyn) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Kostiantyn.Afanasiev@cs.khpi.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6665-7459.

УДК 004.8:004.9:504:628.4 DOI: 10.20998/2413-3000.2026.12.11

А. М. ТРИГУБА, І. Л. ТРИГУБА, І. Р. ФІРМАН, В. Ю. ФАМУЛЯК, Н. Я. КОВАЛЬ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У ЦИРКУЛЯРНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ

Обґрунтовано доцільність створення інтелектуальної системи прогнозування та інтегральної оцінки екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами, орієнтованої на муніципальний рівень управління. Запропонований підхід до створення інтелектуальної системи базується на інтеграції багаторівневих потоків даних із сенсорних мереж, геоінформаційних систем, реєстрів, інформаційних платформ органів місцевого самоврядування та комунальних підприємств у єдиний аналітико-прогнозний контур. Розроблено структурно-функціональну модель інтелектуальної системи у вигляді багаторівневої архітектури, що поєднує модулі збору та агрегації даних, аналітико-інтеграційний рівень, прогнозно-модельний блок, модуль оцінки екологічних ризиків і систему підтримки прийняття рішень, з механізмами зворотного зв'язку, адаптації та навчання. Запропоновано структурно-логічну модель інтегральної оцінки екологічних ризиків, яка формалізує процес прогнозування негативних подій на основі імовірнісної оцінки їх настання та кількісного аналізу потенційних екологічних наслідків. Запропоновано інтегральний індекс ризику як узагальнений показник багатофакторної природи екологічної небезпеки, що забезпечує уніфіковану шкалу оцінювання, класифікацію ризикових станів та їх трансформацію у формалізовані управлінські рішення. Реалізовано ризик-орієнтовану логіку категоризації небезпек із формуванням сценаріїв реагування та адаптивного управління. Отримані результати формують цілісну методологічну основу для побудови інтелектуальних інформаційних систем екологічної безпеки в умовах циркулярної економіки та цифрового врядування. Запропоновані моделі забезпечують системну інтеграцію прогнозування, аналітики, оцінки ризиків і підтримки прийняття рішень, створюючи передумови для впровадження ризик-орієнтованих стратегій управління органічними відходами на рівні територіальних громад, підвищення екологічної стійкості муніципальних систем і науково обґрунтованої цифрової трансформації процесів екологічного управління.

Ключові слова: інтелектуальна система; екологічні ризики; циркулярні системи; органічні відходи; прогнозування ризиків; інтегральна оцінка; підтримка прийняття рішень; муніципальне управління; цифрове врядування.

A. TRYHUBA, I. TRYHUBA, I. FIRMAN, V. FAMULIAK, N. KOVAL

INTELLIGENT FORECASTING OF ENVIRONMENTAL RISKS IN CIRCULAR ORGANIC WASTE MANAGEMENT SYSTEMS

An intelligent system for forecasting and integrated assessment of environmental risks in circular organic waste management systems is developed with a focus on the municipal governance level. The proposed approach is based on the integration of multi-source data flows from sensor networks, geographic information systems, public registries, municipal information platforms, and utility services into a unified analytical and predictive framework. A structural–functional model of the intelligent system is constructed as a multi-layer architecture that combines data acquisition and aggregation modules, an analytical–integration layer, a predictive modeling block, an environmental risk assessment module, and a decision support system, complemented by feedback, adaptation, and learning mechanisms. A structural-logical model for the integrated assessment of environmental risks is developed to formalize the forecasting of hazardous events by combining probabilistic estimation of event occurrence with quantitative evaluation of potential environmental impacts. An integral risk index is proposed as a unified multi-factor indicator of environmental hazard, enabling standardized risk measurement, classification of risk states, and their transformation into formalized management decisions. A risk-oriented categorization logic is implemented to support scenario-based response strategies and adaptive management processes. The obtained results establish a coherent methodological foundation for building intelligent environmental safety systems within the framework of circular economy and digital governance. The proposed models provide systemic integration of forecasting, analytics, risk assessment, and decision support, forming a unified management contour for organic waste systems. This creates practical preconditions for the implementation of risk-oriented management strategies at the community level, strengthening the ecological resilience of municipal infrastructures and supporting scientifically grounded digital transformation of environmental governance processes.

Keywords: intelligent system; environmental risks; circular systems; organic waste management; risk forecasting; integrated risk assessment; decision support systems; municipal governance; digital environmental management.

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси у сфері управління відходами відбуваються в умовах одночасного посилення екологічних викликів, цифровізації управлінських процесів та переорієнтації економічних систем на принципи циркулярної економіки [1]. Органічні відходи, які становлять значну частку у структурі побутових та агропромислових відходів, поступово трансформуються з категорії екологічної проблеми у стратегічний ресурс розвитку територій. Водночас саме органічна фракція формує найбільші екологічні загрози, пов'язані з викидами метану, забрудненням ґрунтів і водних ресурсів, деградацією екосистем та зростанням соціально-екологічної напруженості в громадах.

У межах циркулярної парадигми основним завданням стає не лише організація збору, переробки та повторного використання відходів, а й прогнозування екологічних ризиків як основи превентивного управління негативними наслідками. Традиційні підходи до екологічного моніторингу, що базуються переважно на ретроспективному аналізі статистичних даних, є недостатніми в умовах динамічних змін, просторової неоднорідності територій та зростання складності соціо-еколого-економічних систем. Це зумовлює потребу переходу до інтелектуальних інформаційних технологій, орієнтованих на прогнозування, моделювання сценаріїв розвитку та підтримку управлінських рішень.

Особливої актуальності набуває задача прогнозування екологічних ризиків на

© А. М. Тригуба, І. Л. Тригуба, І. Р. Фірман, В. Ю. Фамуляк. Н. Я. Коваль, 2026

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

муніципальному рівні, де управлінські рішення щодо органічних відходів безпосередньо впливають на якість життя населення, екологічну безпеку та стійкість територіальних громад [2]. За цих умов управління відходами трансформується з інфраструктурної функції у складову стратегічного управління розвитком територій, що вимагає інтеграції екологічних, економічних, соціальних і цифрових компонентів у єдину систему прийняття рішень. Створення інтелектуальних інформаційних систем прогнозування екологічних ризиків забезпечує науково-методологічну основу для переходу від реактивних моделей реагування до проактивного управління ризиками в циркулярних системах управління органічними відходами.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами, орієнтованої на підтримку управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та сталого розвитку територій. Запропонована інформаційна технологія спрямована на формування цифрового інструментарію, здатного забезпечувати проактивне управління екологічними загрозами на основі прогнозних моделей і аналітики даних у межах циркулярної економіки.

Для досягнення поставленої мети у роботі слід вирішити такі основні наукові задачі:

- розробити структурно-функціональну модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами на основі інтеграції даних, аналітичних і прогнозних модулів;
- побудувати структурно-логічну модель інтегральної оцінки екологічних ризиків, що враховує імовірність настання негативних подій та потенційні екологічні наслідки в системах поводження з органічними відходами.

Таким чином, поставлені задачі забезпечують цілісну наукову логіку дослідження, що поєднує технологічний, модельний та управлінський рівні формування інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків.

Аналіз використаних літературних джерел. На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що науковці зосереджували свою увагу на окремих наукових напрямках, що частково формують теоретичну та методологічну основу інтелектуальних інформаційних технологій прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами. Роботи [3, 4] формують концептуальну базу циркулярної економіки та сталого управління ресурсами, у межах яких органічні відходи розглядаються не лише як екологічна проблема, а як елемент замкнених матеріально-енергетичних циклів розвитку територій. У дослідженнях [5] розкрито підходи до цифровізації систем управління відходами та застосування інтелектуальних інформаційних платформ у муніципальному управлінні, що створює підґрунтя для інтеграції прогнозних моделей у практику прийняття управлінських рішень.

Заслуговує на увагу наукова праця [6], у якій розглянуто методи моделювання екологічних ризиків та формалізовані підходи до оцінювання імовірності настання негативних екологічних подій. Ці дослідження закладають методологічні основи ризик-орієнтованого управління та дозволяють перейти від описового аналізу екологічної ситуації до кількісного прогнозування ризиків. Робота [7] присвячена застосуванню методів штучного інтелекту та аналізу даних у сфері екологічного моніторингу і управління відходами, що підтверджує ефективність інтелектуальних моделей у задачах прогнозування складних екосистемних процесів.

Дослідження [8, 9] формують наукову основу для побудови систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та управління територіальним розвитком, де інтегруються прогностичні моделі, аналітичні інструменти та сценарне планування. У праці [10] розглянуто структури цифрових платформ управління ресурсами, що дозволяє інтерпретувати інтелектуальні інформаційні технології як складні кіберфізичні системи, орієнтовані на підтримку стратегічного управління.

Окремі дослідження [11, 12] присвячені управлінню екологічними ризиками у напрямі сталого розвитку та кліматичних викликів. У них автори підкреслюють потребу інтеграції прогнозних моделей у системи територіального управління. Роботи [13–15], що містять авторські підходи до інтелектуального управління інфраструктурними, екологічними та ресурсними системами, підтверджують доцільність використання інтелектуальних інформаційних технологій як базису для формування цифрових систем управління нового покоління.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що наявні наукові підходи охоплюють окремі аспекти циркулярної економіки, управління органічними відходами, моделювання екологічних ризиків та цифровізації управлінських процесів. Водночас відсутні комплексні інтелектуальні інформаційні технології, які інтегрують процеси прогнозування екологічних ризиків, аналітику даних і механізми підтримки прийняття рішень у межах єдиної циркулярної системи управління органічними відходами. Це зумовлює наукову актуальність і практичну значущість розроблення інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків як інструменту стратегічного управління розвитком територій у напрямі циркулярної економіки.

Структурно-функціональна модель прогнозування екологічних ризиків. Структура інтелектуальної інформаційної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах

управління органічними відходами формується як багаторівнева інтегрована система. Вона поєднує процеси збору даних, аналітичної обробки, прогнозного моделювання та підтримки прийняття управлінських рішень у єдиному цифровому середовищі. Її побудова ґрунтується на принципі функціональної ієрархії, де кожен рівень виконує окрему логічну функцію, але водночас є частиною цілісної інформаційної екосистеми.

Базовий рівень забезпечує інтеграцію структурованих і неструктурованих даних у єдине інформаційне середовище, що створює основу для подальшої аналітичної обробки отриманих даних. Формально потік даних представляється у вигляді множини:

$$D = \{d_1, d_2, \ldots, d_n\}, \quad (1)$$

де d_i – окремі інформаційні потоки (сенсорні, просторові, статистичні, адміністративні тощо), що характеризують процеси утворення, накопичення, переробки та утилізації органічних відходів.

Наступний рівень інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків відображає аналітико-інтеграційний модуль, який забезпечує попередню обробку даних, фільтрацію шумів, нормалізацію показників та просторово-часову синхронізацію інформаційних потоків. Саме на цьому рівні відбувається формування єдиного інформаційного простору, у якому дані з різних джерел набувають узгодженого формату та семантичної цілісності. Аналітична трансформація даних подається у вигляді виразу:

$$T : D \to X, \quad (2)$$

де $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_m\}$ – множина ознак, що використовуються у прогнозних моделях екологічних ризиків.

Основним елементом інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків є прогнозно-модельний рівень. Прогнозний компонент формує оцінку ризику як функцію від вхідних ознак:

$$R_{env}(t) = f(X(t), \Theta), \quad (3)$$

де $R_{env}(t)$ – прогнозне значення екологічного ризику у t-й момент часу; $X(t)$ – вектор ознак; Θ – параметри інтелектуальної моделі.

Запропонований підхід (3) дозволяє реалізувати адаптивне прогнозування, чутливе до змін у середовищі функціонування циркулярної системи управління органічними відходами (рис. 1).

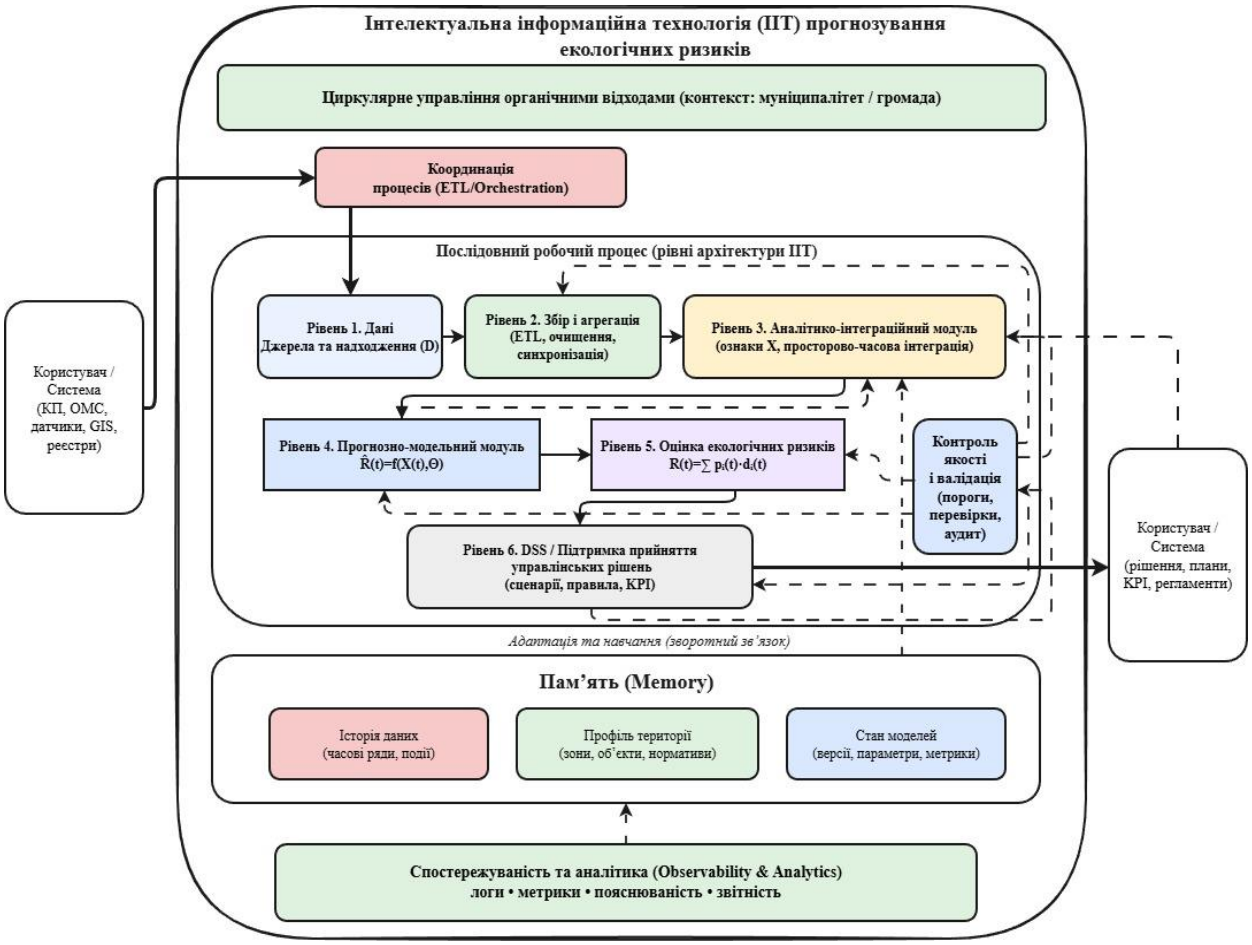

Рис. 1. Структурно-функціональна модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами

ISSN 2311-4738 (print)
ISSN 2413-3000 (online)

Над прогнозним рівнем формується рівень підтримки прийняття управлінських рішень, який забезпечує інтерпретацію результатів прогнозування, формування сценаріїв розвитку ситуації та вибір оптимальних стратегій управління.

Структура інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків дозволяє реалізувати принцип модульності, що забезпечує масштабованість та адаптивність інформаційної технології до змін умов функціонування системи. Це створює можливість поступового розширення функціональності без порушення цілісності системи.

Таблиця 1 – Функціональні рівні інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків

Рівень системи	Функціональне призначення
Збір даних	Агрегація сенсорних, просторових, статистичних та адміністративних даних
Аналітична інтеграція	Нормалізація, фільтрація, синхронізація, формування ознак
Прогнозне моделювання	Побудова моделей прогнозування екологічних ризиків
Оцінка ризиків	Формування інтегральних показників ризику
Підтримка рішень	Генерація сценаріїв та управлінських рекомендацій

Інтеграція аналітичних і прогнозних модулів у єдину інтелектуальну систему дозволяє реалізувати принцип проактивного управління, за якого система не лише фіксує наявні екологічні проблеми, а й формує прогнозні сценарії їх розвитку. Такий підхід принципово відрізняється від традиційних моделей управління відходами, що мають реактивний характер і орієнтовані переважно на ліквідацію наслідків негативних екологічних процесів.

Для прогнозно-модельного рівня реалізовано ансамбль моделей, що забезпечують відтворюване прогнозування екологічних ризиків залежно від типу події та структури даних. Для задач бінарного прогнозу настання інцидентів (витік фільтрату, перевищення запахового навантаження, збій біопроцесу тощо) використано логістичну регресію, градієнтний бустинг XGBoost та рекурентні нейронні мережі типу LSTM для урахування часових залежностей. Для задач оцінювання інтенсивності подій використано моделі аналізу виживання (Cox proportional hazards) і пуассонівську регресію.

Навчання моделей проводилося на даних моніторингу системи управління органічними відходами Львівської міської територіальної громади, зокрема з використанням звітів ЛКП «Зелене місто» (м. Львів), даних автоматизованого обліку контейнерних майданчиків, журналів звернень громадян щодо запахового навантаження, а також метеорологічних даних Львівського регіонального центру з гідрометеорології. Навчання моделей здійснювалося за принципом ковзного вікна з часовою крос-валідацією. Вхідний вектор ознак включав технологічні параметри об'єктів переробки, метеорологічні фактори, логістичні показники та просторові характеристики локацій. Для усунення мультиколінеарності застосовано відбір ознак за критеріями інформаційної значущості (SHAP, mutual information).

Якість прогнозів оцінювалася за метриками AUC-ROC, Brier score, precision-recall, а також за калібрувальними кривими. Порівняння моделей показало, що для коротких горизонтів (до 24 год) найкращі результати дає XGBoost, тоді як для довших горизонтів (48…96 год) перевагу має LSTM за рахунок урахування сезонності та інерційності біопроцесів. Середня абсолютна помилка оцінки інтенсивності подій становила 6,8%, що є прийнятним для задач превентивного управління. Отримані показники підтверджують придатність моделей для використання у інтелектуальній системі прогнозування екологічних ризиків.

Запропонована структура інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків забезпечує основу для побудови цифрових платформ управління органічними відходами нового покоління. У них екологічні ризики розглядаються не як побічний ефект функціонування системи, а як основний об'єкт прогнозного та стратегічного управління в межах циркулярної економіки. Вона забезпечує логічну інтеграцію даних, моделей і управлінських механізмів у єдину інформаційно-аналітичну екосистему, що підвищує якість управлінських рішень і рівень екологічної безпеки територій.

Структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків. Формалізовану модель прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами будовано як поєднання двох взаємопов'язаних контурів (рис. 2). Перший контур відповідає за прогноз імовірності настання небажаних подій у часовому горизонті τ з урахуванням поточного стану системи та зовнішніх чинників. Другий контур виконує оцінювання потенційних екологічних наслідків цих подій, агрегує їх у стандартизовані показники та формує інтегральний індекс ризику $R(t,\tau)$, який використовується у системі підтримки прийняття рішень. тощо).

Формалізація подій, стану та факторів

Нехай циркулярна система поводження з органічними відходами в t-й момент часу описується вектором контрольованих змінних:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \ldots, x_m(t)\}. \quad (4)$$

Складові виразу (4) включають технологічні параметри (температура компостування, вологість, час витримки, навантаження на ємності), організаційні та логістичні показники (частота вивезення, наповнення контейнерів, просторові маршрути), а також метеорологічні та сезонні фактори. Множину потенційно небажаних подій позначимо

$E = \{E_1, \ldots, E_n\}$, де типові події включають витік фільтрату, перевищення запахового навантаження, збій аерації, некоректне сортування з домішками, перегрів/переохолодження біопроцесу, несанкціоноване накопичення відходів у точках збору.

Для кожної події E_i вводиться прогнозована імовірність на горизонті τ:

$$p_i(t,\tau) = \mathbb{P}\left(E_i \text{ станеться на } [t, t+\tau] \mid X(t), H\right), \quad (5)$$

де H – історичні дані спостережень та інцидентів, що використовується для навчання і калібрування.

Прогнозування імовірностей настання подій

У практичних реалізаціях $p_i(t,\tau)$ слід представити як бінарну ймовірність (класифікаційний підхід), або як інтенсивність (hazard) з подальшим перерахунком у ймовірність (підхід аналізу виживання).

Для класифікаційного підходу базова формула має вигляд:

$$p_i(t,\tau) = \sigma\left(\beta_i^\top z(t,\tau)\right), \quad (6)$$

де $\sigma(\cdot)$ – логістична функція; $z(t,\tau)$ – вектор ознак (у тому числі лаги та ковзні статистики); $\beta_i^\top$ – параметри моделі.

Для прогнозування подій, що істотно залежать від накопичення та часу експозиції пропонується використовувати функцію ризику $\lambda_i(t)$ та функцію виживання:

$$p_i(t,\tau) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+\tau} \lambda_i(u)\,du\right), \quad (7)$$

Моделлю передбачається, що вибір конкретного прогнозного ядра не є жорстко фіксованим. Це пов'язано із тим, що у прикладних задачах достатньо забезпечити відтворювану процедуру навчання, регулярне оновлення та контроль якості прогнозу через метрики калібрування (Brier score) і дискримінації (AUC) з урахуванням дисбалансу класів інцидентів.

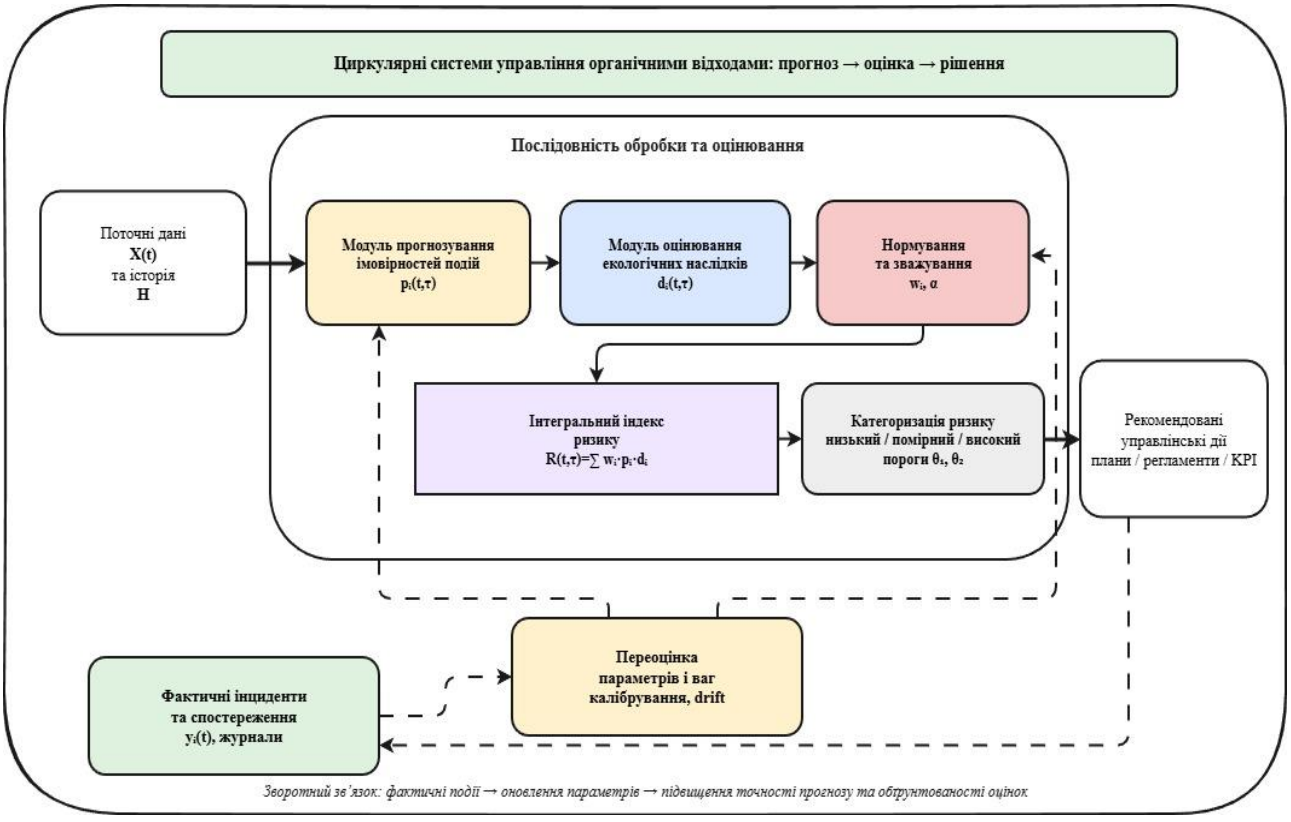

Рис. 2. Структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків

Оцінювання екологічних наслідків

Екологічні наслідки подій доцільно подати як функцію завданої шкоди $d_i(t,\tau)$, яка відображає очікуваний негативний вплив на компоненти довкілля та населення громад.

У типових випадках наслідки є багатовимірними, тому вводиться вектор компонент завданої шкоди:

$$\mathrm{c}_i(t,\tau) = \left(c_i^{(w)}(t,\tau), c_i^{(a)}(t,\tau), c_i^{(s)}(t,\tau), c_i^{(h)}(t,\tau)\right), \quad (8)$$

де w, a, s, h – відповідно індекси, що відповідають завданій шкоді воді, повітрю, ґрунтам та санітарно-гігієнічним аспектам.

Для отримання скалярної оцінки наслідків завданої шкоди застосовується зважене агрегування з нормуванням компонент:

$$d_i(t,\tau) = \sum_{k\in\{w,a,s,h\}} \alpha_k \tilde{c}_i^{(k)}(t,\tau), \quad \sum_k \alpha_k = 1,\ \alpha_k \geq 0. \quad (9)$$

Нормовані компоненти $\tilde{c}_i^{(k)}$ визначають на основі відношення до допустимих (цільових) значень або через шкалу 0–1:

$$\tilde{c}_i^{(k)}(t,\tau) = \min\left(1, \frac{c_i^{(k)}(t,\tau)}{c_{i,ref}^{(k)}}\right), \quad (10)$$

де $c_{i,ref}^{(k)}$ – референтний рівень (норматив, технологічний ліміт або погоджений «пороговий» рівень для громади).

Інтегральна оцінка ризику та категоризація

Інтегральний ризик системи на горизонті τ визначаємо як зважену суму добутків «імовірність × наслідки»:

$$R(t,\tau) = \sum_{i=1}^{n} w_i\, p_i(t,\tau) d_i(t,\tau), \quad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1,\ w_i \geq 0. \quad (11)$$

Коефіцієнти w_i відображають пріоритетність типів подій з позиції муніципальної політики, ресурсних обмежень та екологічної чутливості території. Для переходу від числового $R(t,\tau)$ до управлінських рішень вводяться порогові рівні:

$$RiskClass(t,\tau) = \begin{cases} низький, & R(t,\tau) < \theta_1, \\ помірний, & \theta_1 \leq R(t,\tau) < \theta_2, \\ високий, & R(t,\tau) \geq \theta_2, \end{cases} \quad (12)$$

де $R(t,\tau)$ – інтегральний індекс екологічного ризику у t-й момент часу для горизонту прогнозування τ;

θ_1, θ_2 – порогові значення (критерії класифікації), що задаються на основі нормативних екологічних стандартів, експертних оцінок та процедур адаптивного калібрування моделі.

Для територій з неоднорідною чутливістю (водоохоронні зони, наближеність до житлової забудови) вводиться просторовий множник вразливості $v(s)$ для локації s, тоді ризик уточнюється за виразом:

$$R_s(t,\tau) = v(s) R(t,\tau). \quad (13)$$

Нами сформована специфікація подій і параметрів запропонованої моделі, яка представлена у таблиці 2. Запропонована таблиця 2 використовується як формалізована «карта подій» для узгодження між технологами, екологами та управлінцями. Вона спрощує налаштування ваг w_i, α_k та порогів θ_1, θ_2, а також підтримує аудит рішень.

Оновлення параметрів та узгодження з фактичними подіями

Для забезпечення практичної придатності моделі важливо закріпити механізм переоцінки ваг та параметрів у часі. Якщо зафіксовано реальні події $y_i(t) \in \{0,1\}$, то важливою є калібрувальна поправка до прогнозів. Наприклад через ізотонічну регресію або плаваючий коефіцієнт калібрування γ_i:

$$p_i^{cal}(t,\tau) = \sigma\left(\gamma_i \cdot logit(p_i(t,\tau))\right). \quad (14)$$

При цьому ваги w_i коригуються за принципом зростання пріоритету для подій, які дають найбільший внесок у реальні втрати або повторювані скарги. У результаті модель зберігає інтерпретованість (через структуру «ймовірність × наслідки»), але набуває адаптивності до змін сезонності, логістики та стану інфраструктури.

Таблиця 2 – Структура подій, прогнозних ознак та оцінок наслідків використовуваних у моделі прогнозування екологічних ризиків

Подія E_i	Приклади основних ознак $z(t,\tau)$	Компоненти наслідків c_i	Типова інтерпретація d_i
Витік фільтрату	рівень (тиск) у ємностях, опади, стан дренажу, наповненість	$c^{(w)}, c^{(s)}$	ризик забруднення вод/ґрунтів
Запахове навантаження	температура, вологість, інтенсивність аерації, вітер	$c^{(a)}, c^{(h)}$	дискомфорт (скарги населення)
Домішки у фракції	частка неорганіки, якість сортування, маршрути	$c^{(s)}, c^{(h)}$	погіршення якості компосту (санітарні ризики)
Збій біопроцесу	температура, pH, C/N, час витримки	$c^{(a)}, c^{(w)}$	Викиди (фільтрат)

Представлена структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків забезпечує чіткий перехід від даних до прогнозу, від прогнозу до числової інтегральної оцінки ризику та від оцінки ризику до класифікації рівнів ризику з подальшим формуванням управлінських рішень для заданої громади.

Нами представлено рекомендовані управлінські дії для кожного класу (табл. 3).

Формалізація ефекту зниження екологічного ризику

Очікуваний ефект від впровадження комплексу управлінських заходів $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_m\}$ пропонується описувати у вигляді функції зменшення інтегрального ризику:

$$\Delta R(t,\tau) = R_{before}(t,\tau) - R_{after}(t,\tau), \quad (15)$$

де $R_{before}(t,\tau)$ – інтегральний ризик до впровадження управлінських дій; $R_{after}(t,\tau)$ – інтегральний ризик після їх реалізації.інтегральний ризик після їх реалізації.

Таблиця 3 – Рекомендовані управлінські дії залежно від класу екологічного ризику

Клас ризику	Умови	Характер ризику	Рекомендовані управлінські дії	Пріоритет
Низький	$R(t,\tau) < \theta_1$	Фонові екологічні наванта-ження, стабільні процеси	Плановий моніторинг, профілактичне обслуговування, корегування регламентів, оптимізація логістики потоків відходів	Низький
Помірний	$\theta_1 \le R(t,\tau) < \theta_2$	Локальні ризики, потенційні відхилення	Адаптивне управління процесами, корегування маршрутів, підсилення контролю якості, локальні технічні втручання, сценарне планування	Середній
Високий	$R(t,\tau) \ge \theta_2$	Критичні екологічні загрози, висока імовірність негативних наслідків	Негайні управлінські рішення, аварійні регламенти, обмеження операцій, екстрена логістична переорієнтація, мобілізація резервних потужностей	Високий

З урахуванням впливу окремих управлінських заходів ефект описується як:

$$R_{after}(t,\tau) = R(t,\tau) \cdot \prod_{k=1}^{m} \left(1-\eta_k\right), \quad (16)$$

де $\eta_k \in [0,1]$ – коефіцієнт ефективності k-го управлінського рішення, що відображає частку зниження ризику за рахунок відповідної дії.

Відповідно, очікуваний інтегральний ефект зниження ризику визначається за формулою:

$$\Delta R(t,\tau) = R(t,\tau)\left(1-\prod_{k=1}^{m}(1-\eta_k)\right). \quad (17)$$

Запропонована модель дозволяє інтерпретувати управлінські дії як керовані впливи на структуру ризику, що змінюють як імовірності настання негативних подій $p_i(t,\tau)$, так і величину потенційних екологічних наслідків $d_i(t,\tau)$. Коефіцієнти ефективності η_k визначаються на основі історичних даних, експертних оцінок та результатів машинного навчання, що забезпечує адаптивний характер процесу управління ризиками. Такий підхід формує замкнений контур «прогнозування → оцінка → управління → навчання», який є основою інтелектуального ризик-орієнтованого управління у циркулярних системах поводження з органічними відходами.

Висновки. Розроблена структурно-функціональна модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами забезпечує інтеграцію різних джерел інформації, аналітичних механізмів та прогнозних модулів у єдиний керований контур. Він сформований у вигляді 6-рівневої архітектури, що включає 12 функціональних процесів та 20 логічних і інформаційних зв'язків між модулями збору даних, агрегації, аналітичної інтеграції, прогнозування, оцінювання ризиків і підтримки прийняття рішень. Це забезпечує виконання процесів безперервного моніторингу, адаптивного аналізу та системної підтримки управлінських рішень у системах циркулярного управління органічними відходами.

Запропонована структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків дозволяє формалізувати процес прогнозування небезпечних подій з урахуванням як імовірнісної складової їх настання, так і потенційних екологічних наслідків. Вона передбачає виконання 7 взаємопов'язаних процесів, вміщує 5 основних функціональних модулів, а також 3 контури зворотного зв'язку та 15 інформаційно-логічних зв'язків між блоками прогнозування, оцінювання наслідків, інтеграції, категоризації ризиків і формування управлінських рішень. Це забезпечує уніфіковану формалізацію стану ризиків, їх класифікацію та системну трансформацію аналітичних результатів у прикладні управлінські дії у системі підтримки прийняття управлінських рішень.

Отримані результати формують методологічну основу для побудови інтелектуальних інформаційних систем екологічної безпеки в умовах циркулярної економіки, забезпечують науково обґрунтовану інтеграцію прогнозування, оцінювання та управління ризиками, а також створюють передумови для впровадження ризик-орієнтованих стратегій розвитку муніципальних систем управління органічними відходами.

Список літератури

1. Seyyedi S. R., Kowsari E., Gheibi M., Chinnappan A., Ramakrishna S. A comprehensive review of integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 429. Article 142584. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142584
2. Kazuva E., Zhang J., Tong Z., Si A., Na L. The DPSIR model for environmental risk assessment of municipal solid waste in Dar es Salaam city, Tanzania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 8. Article 1692. doi: 10.3390/ijerph15081692
3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
4. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221–232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
5. Bibri S. E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 31. P. 183–212. doi: 10.1016/j.scs.2017.02.016
6. Zeng G., Jiang Y., Wu Z. Integrated risk assessment of environmental hazards: A systematic approach. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 67. P. 329–340. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.006
7. Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuiev D., Dotsenko N. Sustainable development projects implementing in BANI

environment based on AI tools. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 6. Article 2607. doi: 10.3390/su17062607
8. Лисенко О. О., Кононенко І. В. Модель вибору сторонніх інструментів в ІТ-проєктах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2025. № 2 (11). С. 37–46. doi: 10.20998/2413-3000.2025.11.5
9. Гринченко М., Роговий М., Грінченко Є. Розробка інформаційних технологій для інтелектуального планування роботи команди ІТ-проєкту на основі гнучкої методології. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2024. № 2 (9). С. 9–15. doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.2
10. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. Cyber-physical systems for smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
11. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009325844
12. UN Environment Programme. *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108627146
13. Tryhuba A., Mudryk K., Tryhuba I., Kotsylovskyi M., Sorokin D., Bezaltychna O., Pysz P., Hutsol T. Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. Article 28082. doi: 10.1038/s41598-025-13150-9
14. Tryhuba A., Tryhuba I., Oliinyk R., Andrushkiv O., Kotsylovskyi M. An intelligent model for identifying risks of power supply projects for critical infrastructure facilities in the conditions of emergency and martial law. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4023. P. 32–47. URL: https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper4.pdf (дата звернення: 18.05.2026).
15. Tryhuba I., Tryhuba A., Hutsol T., Faichuk O., Slavina N. European Green Deal: Substantiation of the rational configuration of the bioenergy production system from organic waste. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 17. Article 4513. doi: 10.3390/en17174513

References

1. Seyyedi S. R., Kowsari E., Gheibi M., Chinnappan A., Ramakrishna S. A comprehensive review of integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 429, article 142584. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142584
2. Kazuva E., Zhang J., Tong Z., Si A., Na L. The DPSIR model for environmental risk assessment of municipal solid waste in Dar es Salaam city, Tanzania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, vol. 15, no. 8, article 1692. doi: 10.3390/ijerph15081692
3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 143, pp. 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
4. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017, vol. 127, pp. 221–232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
5. Bibri S. E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2017, vol. 31, pp. 183–212. doi: 10.1016/j.scs.2017.02.016
6. Zeng G., Jiang Y., Wu Z. Integrated risk assessment of environmental hazards: A systematic approach. *Ecological Indicators*. 2016, vol. 67, pp. 329–340. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.006
7. Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuiev D., Dotsenko N. Sustainable development projects implementing in BANI environment based on AI tools. *Sustainability*. 2025, vol. 17, no. 6, article 2607. doi: 10.3390/su17062607
8. Lysenko O. O., Kononenko I. V. Model' vyboru storonnikh instrumentiv v IT-proyektakh [Model for selecting third-party tools in IT projects]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2025, no. 2 (11), pp. 37–46. doi: 10.20998/2413-3000.2025.11.5
9. Hrynchenko M., Rohovyy M., Hrinchenko Ye. Rozrobka informatsiynykh tekhnolohiy dlya intelektual'noho planuvannya roboty komandy IT-proyektu na osnovi hnuchkoyi metodolohiyi [Development of information technologies for intelligent planning of the IT project team work based on agile methodology]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2024, no. 2 (9), pp. 9–15. doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.2
10. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. Cyber-physical systems for smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2015, vol. 3, pp. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
11. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009325844
12. UN Environment Programme. *Global Environment Outlook - GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge, Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108627146
13. Tryhuba A., Mudryk K., Tryhuba I., Kotsylovskyi M., Sorokin D., Bezaltychna O., Pysz P., Hutsol T. Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, no. 1, article 28082. doi: 10.1038/s41598-025-13150-9
14. Tryhuba A., Tryhuba I., Oliinyk R., Andrushkiv O., Kotsylovskyi M. An intelligent model for identifying risks of power supply projects for critical infrastructure facilities in the conditions of emergency and martial law. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025, vol. 4023, pp. 32–47. Available at: https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper4.pdf.
15. Tryhuba I., Tryhuba A., Hutsol T., Faichuk O., Slavina N. European Green Deal: Substantiation of the rational configuration of the bioenergy production system from organic waste. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 17, article 4513. doi: 10.3390/en17174513

Надійшла (received) 25.12.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Тригуба Анатолій Миколайович (Tryhuba Anatoliy) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького, м. Львів, Україна; email: trianamik@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8014-5661

Тригуба Інна Леонтіївна (Tryhuba Inna) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, завідувач кафедри генетики, селекції та захисту рослин, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького, м. Львів, Україна; email: trinle@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5239-5951

Фірман Ігор Романович (Firman Ihor) – здобувач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна; email: firmanigorromanovuch@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5840-9815

Фамуляк Володимир Юрійович (Famuliak Volodymyr) – аспірант кафедри інформаційних технологій, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького, м. Львів, Україна; email: vovfam@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5347-9427.

Коваль Назарій Ярославович (Koval Nazarii) – доктор філософії (PhD), проректор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна; email: kovaln870@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7846-2924

ЗМІСТ

Алізада А., Гурбанова Г., Афандієва А.
Цифрові технології в управлінні будівельними проєктами (eng.) 3
Семенчук К.
Міжкультурні компетенції як фактор ефективності роботи проєктних команд: приклад Німеччини (eng.)....10
Юнусов М. М.
Методологія гібридного моделювання для прогнозування ризиків у сфері надзвичайних ситуацій (eng.) 15
Жержерунов П. Ю., Шматко О. В.
Докеризована архітектура блокчейну для безпечних систем управління ланцюгами постачання (eng.) 20
Зюзюн В. І.
Формування базового концепту методу управління ризиками часових втрат в IT-проєктах на основі моделювання когнітивного профілю команди (eng.) 27
Євланов М. В., Шутько В. В.
Розробка базової моделі вибору стратегії хмарної міграції інформаційної системи 34
Кухарський В. М., БушуєВ С.Д.
Управління через проєкти як методологічна основа стратегічного розвитку освітньо-наукових установ України 46
Луб П. М., Падюка Р. І., Татомир А. В., Заплатинський Н. Б.
Алгоритм узгодження часу початку, обсягів та темпів робіт у проєктах технологічних систем 60
Морозов В. В., Р. Ю. Кулик Р. Ю.
Прогнозування ризиків при управлінні впливами оточення IT-проєктів в умовах фіксованого бюджетування...67
Сокол В. Є., Годлевський М. Д., Малець Д. К., Афанасьєв К. О.
Вербальний опис технології планування підвищення рівня якості процесу розробки програмного забезпечення 74
Тригуба А. М., Тригуба І. Л., Фірман І. Р., Фамуляк В. Ю., Коваль Н. Я.
Інтелектуальне прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами 81

CONTENTS

Alizada A., Gurbanova G., Afandiyeva A.
Digital technologies in construction project management 3
Semenchuk K.
Intercultural competencies as a factor of project team effectiveness: the case study of Germany 10
Yunusov M.
Hybrid modeling methodology for predicting risks in emergency management 15
Zherzherunov P., Shmatko O.
Dockerized blockchain architecture for secure supply chain management systems 20
Ziuziun V.
Formation the basic concept of a method for managing the risk of time losses in IT projects based on modeling the team's cognitive profile 27
Ievlanov M., Shutko V.
Development of a basic model for choosing an information system cloud migration strategy 34
Kukharskyy V. Bushuyev S.
Governece by projects as a methodological framework for the strategic development of educational and scientific institutions in Ukraine 46
Lub P. M., Padyuka R. I., Tatomyr A.V., Zaplatynskyi N.B.
An algorithm for coordinating the start time, work volumes, and execution rates in technological system projects 60
Morozov V., Kulyk R.
Risk forecasting in the management of external factors affecting IT projects under a fixed budget 67
Sokol V., Godlevskyi M., Malets D., Afanasiev K.
A verbal description of the technology for planning the improvement of the quality of the software development process 74
Tryhuba A., Tryhuba I., Firman I., Famuliak V., Koval N.
Intelligent forecasting of environmental risks in circular organic waste management systems 81

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: СТРАТЕГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ, УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ, ПРОГРАМАМИ ТА ПРОЕКТАМИ

Збірник наукових праць

№ 1 (12) 2026

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

Відповідальна за випуск Лобач О. В., канд. техн. наук, доцент

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 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 № 1-26

Підп. до друку 30.04.2026 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний 80 г/м^2.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 10,6. Облік.-вид. арк. 10,6.
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