

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

№ 2(9)

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

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

No. 2(9)

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2024

Kharkiv
NTU "KhPI", 2024

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», 2024. № 2(9). 84 с. ISSN 2311-4738.

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

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

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

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

Ідентифікатор 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

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: *Index Copernicus (Польща), WorldCat (США), ResearchBib (Японія), Directory of Research Journals Indexing, Directory of Open Access Journals (США), Universal Impact Factor, Scientific Indexing Services, Google Scholar* і включений у світовий довідник періодичних видань бази даних *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*.

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

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

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

Chief Editor

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

Відповідальний секретар

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

Executive Secretary

Lobach Olena, PhD, Ass. Professor, Ukraine

Редакційна колегія

Бушуйєв Сергій Дмитрович, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Раскін Лев Григорович, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Романенков Юрій Олександрович, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Саченко Анатолій Олексійович, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Сіра Оксана Володимирівна, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Чумаченко Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, професор, Україна;

Elmas Çetin, доктор наук, професор, Туреччина;

Jaafari Ali, доктор наук, професор, Австралія;

Kolesnikova Kateryna, д-р. техн. наук, професор, Казахстан;

Kryvinska Natalia, д-р. техн. наук, професор, Австрія.

Editorial team

Bushuyev Sergey, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Raskin Lev, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Romanenkov Yuri, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Sachenko Anatoliy, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Sira Oksana, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Chumachenko Igor, Dr. Tech. Sc., Professor, Ukraine;

Elmas Çetin, Doctor of Sciences, Professor, Turkey;

Jaafari Ali, Doctor of Sciences, Professor, Australia;

Kolesnikova Kateryna, Dr. Tech. Sc., Professor, Kazakhstan

Kryvinska Natalia, Dr. Tech. Sc., Professor, Austria.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ». Протокол № 10 від 27 грудня 2024 р.

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

THE EVOLVING LANDSCAPE OF EDUCATION UNDER THE INFLUENCE OF AI

The subject of research explores the transformative impact of Artificial Intelligence (AI) on education, tracing its evolution and analysing its current and potential future implications. With the rapid advancements in AI technologies, education systems worldwide are undergoing significant changes, affecting teaching methodologies, learning experiences, and educational outcomes. This paper examines how AI is reshaping various aspects of education, including personalized learning, adaptive assessment, intelligent tutoring systems, and administrative tasks. Additionally, it discusses the ethical considerations, challenges, and opportunities associated with integrating AI into education. Through an interdisciplinary lens, this paper synthesizes insights from educational psychology, computer science, and pedagogy to provide a comprehensive understanding of the evolving landscape of education in the AI era. The result of the study offers recommendations for policymakers, educators, and researchers to harness the potential of AI while addressing its potential pitfalls, ensuring that education remains inclusive, equitable, and learner-centred in the digital age. Artificial Intelligence (AI) is rapidly transforming the educational landscape, prompting excitement and apprehension. This paper explores the potential of AI to revolutionize education by offering personalized learning, adaptive instruction, enhanced engagement, and automated feedback. The integration of AI also presents significant challenges regarding ethical considerations, teacher training, accessibility, and cost.

Keywords: Artificial Intelligence, Education, Personalized Learning, Adaptive Learning, Ethical Considerations, Educational Equity.

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

РОЗВИТОК ЛАНДШАФТУ ОСВІТИ ПІД ВПЛИВОМ ШІ

Предметом дослідження є вивчення трансформаційного впливу штучного інтелекту (ШІ) на освіту, відстеження його еволюції та аналіз поточних і потенційних майбутніх наслідків. Зі стрімким прогресом технологій штучного інтелекту освітні системи в усьому світі зазнають значних змін, що впливає на методику викладання, досвід навчання та результати навчання. У цій статті розглядається, як ШІ змінює різні аспекти освіти, включаючи персоналізоване навчання, адаптивне оцінювання, інтелектуальні системи навчання та адміністративні завдання. Крім того, у ньому обговорюються етичні міркування, проблеми та можливості, пов'язані з інтеграцією ШІ в освіту. Через міждисциплінарну призму ця стаття синтезує ідеї педагогічної психології, інформатики та педагогіки, щоб забезпечити повне розуміння еволюції освіти в епоху ШІ. Результати дослідження пропонують рекомендації для політиків, викладачів і дослідників щодо використання потенціалу штучного інтелекту, одночасно усуваючи його потенційні підводні камені, забезпечуючи, щоб освіта залишалася інклюзивною, справедливою та орієнтованою на учня в епоху цифрових технологій. Штучний інтелект (ШІ) швидко змінює освітній ландшафт, викликаючи хвилювання та побоювання. У цьому документі досліджується потенціал штучного інтелекту для революції в освіті, пропонуючи персоналізоване навчання, адаптивні інструкції, посилене залучення та автоматизований зворотний зв'язок. Інтеграція штучного інтелекту також створює значні проблеми щодо етичних міркувань, підготовки вчителів, доступності та вартості.

Ключові слова: штучний інтелект, освіта, персоналізоване навчання, адаптивне навчання, етичні міркування, освітня справедливість.

1 Introduction. The educational landscape is undergoing a transformative shift driven by the rapid advancement of Artificial Intelligence (AI). For centuries, education has relied on established structures, methodologies, and curricula delivered by human educators. However, AI is poised to disrupt and reshape the way we learn and teach. The paper explores the evolving landscape of education under the influence of AI. We will examine how AI technologies are being integrated into the classroom, focusing on core processes like content creation, assessment, instruction, and learner engagement. We will analyze the key factors influencing the adoption of AI in education, including technological advancements, policy considerations, societal acceptance, and ethical concerns. The potential benefits of AI in education are significant. Personalized learning experiences, real-time feedback, and adaptive instruction have the potential to improve learning outcomes for all students. AI can also democratize education by providing greater access to learning opportunities for geographically dispersed populations or those with limited resources. Furthermore, by automating administrative tasks and providing data-driven insights, AI can empower educators to focus on more student-centered activities. However, implementing AI in education also presents significant challenges. Cost considerations, teacher training needs, data privacy concerns, and the potential for bias in AI

algorithms require careful attention. A crucial aspect of this exploration will be identifying strategies to ensure the responsible and ethical integration of AI in education. By examining the opportunities and challenges presented by AI, this paper aims to contribute to a comprehensive understanding of the evolving educational landscape. Our ultimate goal is to pave the way for the effective use of AI in education, fostering a more personalized, engaging, and equitable learning experience for all.

2 Related Works. The study [1] was to assess the impact of Artificial Intelligence (AI) on education. Premised on a narrative and framework for assessing AI identified from a preliminary analysis, the scope of the study was limited to the application and effects of AI in administration, instruction, and learning. A qualitative research approach, leveraging the use of literature review as a research design and approach was used and effectively facilitated the realization of the study purpose. Artificial intelligence is a field of study and the resulting innovations and developments have culminated in computers, machines, and other artefacts having human-like intelligence characterized by cognitive abilities, learning, adaptability, and decision-making capabilities. The new challenges and directions face the use of big data and artificial intelligence (AI) in education research, policy-making, and industry [2]. In recent years,

applications of big data and AI in education have made significant headways. This highlights a novel trend in leading-edge educational research. The convenience and embeddedness of data collection within educational technologies, paired with computational techniques have made the analyses of big data a reality. To analyze the current research status and trends of artificial intelligence in the education field [3], applied bibliometric methods to examine the articles published in one of the representative journals of the field, the International Journal of Artificial Intelligence in Education. This paper [4] seeks to provide an overview of research on AI applications in higher education through a systematic review. Out of 2656 initially identified publications for the period between 2007 and 2018, 146 articles were included for final synthesis, according to explicit inclusion and exclusion criteria. The descriptive results show that most of the disciplines involved in AI papers come from Computer Science and STEM, and that quantitative methods were the most frequently used in empirical studies. The study [5] aimed to explore the future direction of education by examining the current impact and predicting future impacts of AI. It also examined research trends and collaboration status by country through network analysis, topic modelling and global research trends in AI in education (AIED), by applying the Latent Dirichlet Allocation algorithm. This study [6] provided a content analysis of studies aiming to disclose how artificial intelligence (AI) has been applied to the education sector and explore the potential research trends and challenges of AI in education. A total of 100 papers including 63 empirical papers (74 studies) and 37 analytic papers were selected from the education and educational research category of the Social Sciences Citation Index database from 2010 to 2020. Artificial intelligence (AI) is a modern technology that has changed several industries, including education [7]. AI has significantly changed the educational landscape. With AI, huge opportunities are available for students to acquire concepts in the technology era without having to rely solely on their lecturers. To understand AI relevancy in educational sectors, this paper covers the AI application areas towards education and its challenges. Artificial intelligence (AI) technologies are used in many dimensions of our lives, including education [8]. Motivated by the increasing use

of AI technologies and the current state of the art, this study examines research on AI from the perspective of online distance education. Following a systematic review protocol and using data mining and analytics approaches, the study examines a total of 276 publications. The technological innovation landscape is rapidly evolving based on the convergence of knowledge and artificial intelligence [9]. This creates unprecedented opportunities and challenges for managing innovative projects. The object of the research is the system of syncretic management of innovative projects in the era of the artificial intelligence explosion. The problem being addressed is related to the application of principles, models, and methods of syncretic management of innovative projects in the context of integrating various elements, including interdisciplinary collaboration, artificial intelligence technologies, and adaptive methodologies, to optimize project outcomes. The result of the research is a system of syncretic management of innovative projects that encompasses various aspects of management, innovation, and integration with artificial intelligence systems. The essence of the obtained results outlines the stages of managing the life cycles of innovative projects, emphasizing resource allocation, risk assessment, and adaptive strategies. In the field of innovation management, the model includes methodologies for idea generation, technological scouting, and open innovation, recognizing the role of artificial intelligence in shaping the innovation environment. A crucial aspect of the model is the integration of artificial intelligence technologies throughout the project.

3 Method and Material

3.1. Conceptual model

Understanding the competence model, the elements, processes, and their interactions, can create a framework for the responsible and effective integration of AI in education, leading to a more personalized, engaging, and equitable learning experience for all. The basic structure of the conceptual model. The structure of the conceptual model "The Evolving Landscape of Education Under the Influence of AI" is presented in Fig. 1.

Core Elements of the conceptual model are presented in Fig. 2.

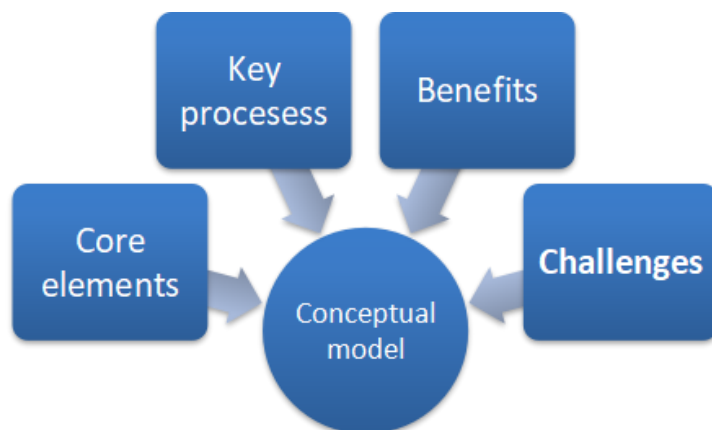


Fig. 1. Structure of conceptual model "The Evolving Landscape of Education Under the Influence of AI"

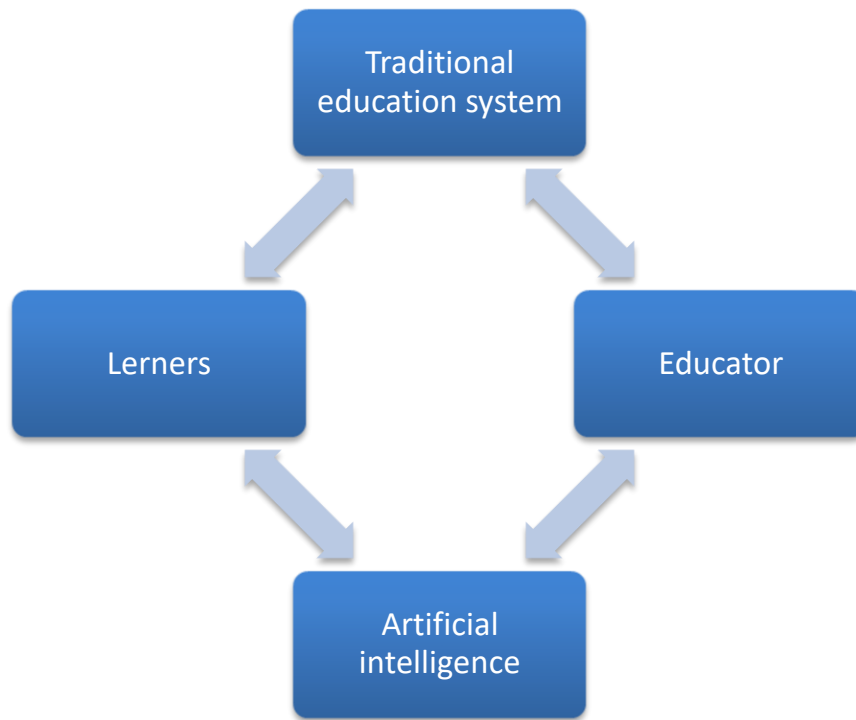


Fig. 2. Core elements of conceptual model evolving landscape of education under the influence of AI

Let’s look at the influencing factors of the conceptual model. Influencing factors define AI should be integrated with the Traditional Education System to enhance, not replace, existing structures. Effective AI in Education requires high-quality Learning Content, Engaged Lernalers, and skilled Educators. Influencing Factors will determine the pace and nature of AI integration in education.

The potential benefit of the application conceptual model evolving the landscape of education under the influence of AI (Table 1).

Let's look at the challenges of application conceptual model evolving landscape of education under the influence of AI (Table 2).

Table 1 – Potential Benefits of Application Conceptual Model Evolving Landscape of education under the influence of AI

N	Potential benefits	Impact
1	Improved Learning Outcomes. Personalized learning experiences, adaptive instruction, and real-time feedback can lead to better learning outcomes for all students.	High
2	Increased Access to Education. AI can provide educational opportunities to geographically dispersed populations or those with limited resources.	High
3	Enhanced Educator Effectiveness. AI can automate tasks, personalize learning materials, and provide data-driven insights to support educators.	Medium
4	Efficient Administration. AI can streamline administrative processes, freeing up educators to focus on teaching.	Low

Table 2 – Challenges of application conceptual model evolving landscape of education under the influence of AI

N	Challenges	Impact
1	Cost & Infrastructure. Implementing and maintaining AI systems can be expensive, and requires access to reliable technology infrastructure.	High
2	Teacher Training & Support. Educators need training on using AI tools effectively, adapting their roles, and addressing ethical considerations.	High
3	Data Privacy & Security. Ensuring data privacy and security of students' learning data is crucial.	Medium
4	Bias & Fairness. AI algorithms can perpetuate existing biases, requiring careful development and monitoring to ensure fairness in education.	Medium

By understanding these elements, processes, and their interactions, have been creating a framework for the responsible and effective integration of AI in education,

leading to a more personalized, engaging, and equitable learning experience for all.

The Evolving Landscape of Education Under the Influence of AI is presented in Table 3.

Table 3 – The Evolving Landscape of Education Under the Influence of AI

Trend	Description	Examples/Applications
Personalized Learning Experiences	AI tailors content to individual learning styles, speeds, and preferences.	Adaptive learning platforms like DreamBox, and personalized curriculum design.
Intelligent Systems (ITS) Tutoring	Virtual tutors provide on-demand assistance and subject-specific expertise.	Chatbots for math tutoring, AI systems like Carnegie Learning.
Enhanced Administrative Efficiency	AI automates grading, optimizes resource management, and predicts student trends.	Automated essay scoring, and predictive analytics for student performance.
Inclusive and Accessible Education	AI removes barriers through translation tools and assistive technologies.	Google Translate for education, text-to-speech tools, closed captioning systems.
Lifelong and Skill-Based Learning	AI supports microlearning and skill development aligned with market needs.	Platforms like Coursera, and LinkedIn Learning recommend personalized career paths.
Immersive and Gamified Learning	AI integrates VR/AR and gamified elements to create interactive, engaging learning experiences.	AR anatomy simulations, AI gamifying quizzes with rewards.
Collaborative and Peer-Learning Platforms	AI enhances group work and connects learners globally for cultural exchange and collaborative insights.	AI-mediated online discussions, platforms like Slack or Microsoft Teams tailored for education.
Ethical and Data Privacy Considerations	Ensuring AI promotes fairness, transparency, and robust data security in educational applications.	Bias detection tools, privacy-focused AI design for schools and learners.
Shift in Educator Roles	Teachers transition to facilitators and co-creators of innovative AI-driven learning experiences.	Professional development for AI in teaching, co-designed AI teaching aids.
Assessment and Credentialing Evolution	AI enables dynamic, competency-based assessments and verifiable, portable digital credentials.	Blockchain-based certificates, AI validating real-world skill applications.

The integration of Artificial Intelligence (AI) into education is revolutionizing how knowledge is delivered, accessed, and managed. The trends outlined highlight a shift towards personalization, efficiency, and inclusivity, with AI offering scalable solutions to meet diverse learner needs.

Key advancements, such as intelligent tutoring systems, adaptive learning platforms, and immersive technologies, are transforming the educational experience by making it more engaging, interactive, and student-centered. Additionally, the focus on lifelong learning and skill development aligns education with the demands of a rapidly evolving job market.

However, the increasing reliance on AI also underscores the importance of addressing challenges like bias, data privacy, and ethical considerations, ensuring that AI applications are transparent, equitable, and secure. The role of educators is evolving to complement AI-driven innovations, positioning them as facilitators and mentors in this technology-enhanced landscape.

In summary, the trends signify a paradigm shift where education is no longer a one-size-fits-all process

but a dynamic, AI-empowered ecosystem fostering continuous learning, creativity, and global collaboration. As these trends mature, they promise to democratize education, making it more accessible, inclusive, and responsive to the complexities of the modern world.

Let's look at how to manage risks in AI-Driven (Table 4).

The integration of AI in education offers immense potential but also introduces a range of risks that need proactive management. These risks, amplified by the unpredictable and complex dynamic environment, highlight the importance of balancing innovation with caution. Key concerns include bias in AI systems, data privacy breaches, and the digital divide, which could exacerbate existing inequities.

Furthermore, challenges like over-reliance on technology, ethical dilemmas, and cultural irrelevance emphasize the need for human oversight and localized approaches. Institutions must adopt a comprehensive risk management framework that prioritizes security, transparency, and inclusivity while fostering trust among stakeholders.

Table 4 – Management of Risks in AI-Driven Education

Risk	Description	Risk Management Strategies
Bias in AI Systems	AI algorithms may reinforce stereotypes or exclude certain demographics due to biased training data.	Implement bias detection and mitigation tools, diversify training datasets, and conduct regular audits.
Data Privacy and Security	Sensitive student and institutional data may be exposed to breaches or misuse.	Enforce robust encryption, comply with data protection regulations (e.g., GDPR), and prioritize ethical AI use.
Over-Reliance on Technology	Excessive dependence on AI may reduce critical thinking and problem-solving skills.	Integrate human oversight, encourage blended learning approaches, and foster independent learning skills.
Digital Divide	Limited access to AI technologies in underserved or remote communities creates inequities.	Invest in infrastructure, provide affordable devices, and develop offline or low-bandwidth AI solutions.
Resistance to Change	Educators and institutions may resist adopting AI due to fear of job displacement or complexity.	Offer training programs, involve educators in AI tool design, and emphasize AI as a support tool, not a replacement.
Ethical Concerns	Unclear accountability for AI decisions may lead to ethical dilemmas in assessments or recommendations.	Establish clear guidelines, ensure the explainability of AI decisions, and involve stakeholders in policy development.
Inaccuracy or Errors in AI Tools	AI may produce incorrect recommendations or assessments, impacting learning outcomes.	Regularly validate AI outputs, involve human reviewers for critical tasks, and refine algorithms with feedback.
Cultural and Contextual Irrelevance	AI models may not account for cultural nuances or regional educational requirements.	Localize AI solutions, involve regional experts in development and adapt tools to cultural and contextual needs.

Mitigating these risks requires collaboration among educators, technologists, policymakers, and learners to ensure that AI applications in education remain equitable, ethical, and aligned with global learning goals. Properly managed, AI can become a transformative force, enhancing educational outcomes and preparing students for a rapidly evolving world.

4 Conclusions and Future Work

The integration of AI into education is still in its early stages, but its potential for transforming the learning experience is undeniable. This paper has explored the various ways AI can reshape educational processes, including content creation, assessment, instruction, and learner engagement. We have also examined the key factors influencing AI adoption, potential benefits, and significant challenges.

Looking towards the future, several key areas require ongoing research and development.

Standardization and Interoperability. Developing standards for AI tools in education will ensure compatibility and facilitate data exchange across platforms.

Teacher Training and Support. Providing educators with comprehensive training on using AI tools effectively, adapting their roles, and addressing ethical considerations is crucial.

AI Explainability and Transparency. Developing AI systems that are transparent and explainable will build trust and empower educators to understand how AI decisions are made.

Mitigating Bias in AI. Continuous efforts are needed to identify and mitigate potential biases in AI algorithms to ensure fairness and inclusivity in education.

Long-term Impact Assessment: Researching the long-term impact of AI on learning outcomes, student engagement, and educator roles will provide valuable insights for future development.

By focusing on these research areas and promoting responsible AI development, we can harness the capabilities of AI to shape the future of education in the following ways:

1 **Personalized.** AI has the potential to customize learning experiences based on individual requirements and learning preferences, leading to more productive educational outcomes.

2 **Engaging.** AI-driven tools can establish interactive and vibrant learning settings that engage and motivate students effectively.

3 **Equitable.** AI can facilitate fair access to high-quality education for every student, irrespective of their background or location. In essence, the effective incorporation of AI in education necessitates cooperation among educators, technologists, policymakers, and researchers. Through collaborative efforts, we can guarantee that AI enriches the educational journey for everyone, paving the path for a more inventive and inclusive educational landscape.

Future research could delve deeper into specific areas of AI application in education, such as:

1 The effectiveness of AI-powered tutoring systems in supporting student learning.

2 The impact of AI-driven personalized learning on student motivation and engagement. The use of AI for assessment and feedback to personalize student learning paths.

3 The development of AI-powered educational games and simulations to enhance learning experiences.

As AI technology continues to develop, can be expected even more innovative and transformative applications to emerge, shaping the future of education for generations to come.

References

1. Chen, L., Chen, P. and Lin, Z. (2020) 'Artificial Intelligence in Education: A Review', *IEEE Access*, 8, pp. 75264–75278. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2988510.
2. Luan, H., Géczy, P., Lai, H., Gobert, J., Yang, S., Ogata, H., Baltes, J., Guerra, R., Li, P., & Tsai, C. (2020). Challenges and Future Directions of Big Data and Artificial Intelligence in Education. *Frontiers in Psychology*, Vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.580820>.
3. Baek, C., & Doleck, T. (2020). A Bibliometric Analysis of the Papers Published in the Journal of Artificial Intelligence in Education from 2015-2019. *International Journal of Learning Analytics and Artificial Intelligence in Education*, 2, 67. <https://doi.org/10.3991/ijai.v2i1.14481>.
4. Zawacki-Richter, O., Marín, V., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators?. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>.
5. Paek, S., & Kim, N. (2021). Analysis of Worldwide Research Trends on the Impact of Artificial Intelligence in Education. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU13147941>.
6. Zhai, X., Chu, X., Chai, C., Jong, M., Istenič, A., Spector, M., Liu, J., Yuan, J., & Li, Y. (2021). A Review of Artificial Intelligence (AI) in Education from 2010 to 2020. *Complex.*, 2021, 8812542:1-8812542:18. <https://doi.org/10.1155/2021/8812542>.
7. Jebadurai, D., Dheenadayalan, M., & Chandrasekaran, D. (2023). Relevancy of Artificial Intelligence in Education: A Conceptual Review. *Journal of Informatics Education and Research*. <https://doi.org/10.52783/jier.v3i2.322>.
8. Dogan, M., Dogan, T., & Bozkurt, A. (2023). The Use of Artificial Intelligence (AI) in Online Learning and Distance Education Processes: A Systematic Review of Empirical Studies. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13053056>.
9. Bushuyev, S. D., & Ivko, A. V. CONSTRUCTION OF MODELS AND APPLICATION OF SYNCRETIC INNOVATION PROJECT MANAGEMENT IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3/3 (129) 2024 (p. 44–54) DOI: 10.15587/1729-4061.2024.306436.

Received (надійшла) 20.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

Пузіичук Андрій Вікторович (Puziichuk Andriy) – доктор філософії, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, доцент кафедри управління проектами, м. Київ, Україна; e-mail: a.puziichuk2018@meta.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7197-5855>

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

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

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

M. GRINCHENKO, M. ROHOVYI, E. GRINCHENKO

DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR INTELLIGENT PLANNING OF THE IT PROJECT TEAM'S WORK BASED ON A FLEXIBLE METHODOLOGY

The subject of the study is the development of information technology for intelligent planning of the IT project team. The purpose of the study is to reduce project risks associated with the perception of tasks and their distribution among team members within the project sprint by introducing methods and models for intelligent planning of the IT project team. The information technology is developed on the basis of a set of methods and models, namely: a method for intelligent planning of the IT project team; a model for evaluating a textual description of a task; a method for improving textual descriptions of project tasks; a model for distributing sprint tasks among performers; a method for generating recommendations when planning the work of an IT project team. The use of models related to the processing of textual descriptions of project tasks provides a better understanding of the tasks by the team and increases the efficiency of project implementation. The use of artificial intelligence, including large language models, and stable distribution algorithms in management processes contributes to the automation and efficiency of working with project sprint tasks, increases productivity and team cohesion. The result of the study is an information technology based on the integration of artificial intelligence into sprint planning, task allocation, and risk management. The application of the proposed information technology has significant potential to increase project flexibility, efficiency, and overall success. The developed information technology takes into account the project context and expert opinions, which makes it flexible and adaptive to the specifics of a particular project and team characteristics, which is important for further improving project management processes. The information technology for intelligent planning of the IT project team's work will allow you to assess and reduce the negative impact of factors that threaten the timing and quality of the project by analyzing historical data and modeling team behavior.

Keywords: intelligent planning, information technology, large language model, method, model, IT team, project management, stable.

M. ГРИНЧЕНКО, М. РОГОВИЙ, Є. ГРИНЧЕНКО

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ КОМАНДИ ІТ-ПРОЄКТУ НА ОСНОВІ ГНУЧКОЇ МЕТОДОЛОГІЇ

Предметом дослідження є розробка інформаційної технології для інтелектуального планування команди ІТ-проєкту. Мета дослідження – знизити проєктні ризики, які пов'язані зі сприйняттям завдань та їх розподілом між членами команди в рамках проєктного спринту, шляхом впровадження методів і моделей інтелектуального планування команди ІТ-проєкту. Інформаційна технологія розроблена на основі набору методів і моделей, а саме: метод інтелектуального планування команди ІТ-проєкту; модель оцінювання текстового опису завдання; метод удосконалення текстових описів проєктних завдань; модель розподілу завдань спринту між виконавцями; метод генерації рекомендацій при плануванні роботи команди ІТ-проєкту. Використання моделей, які пов'язані з обробкою текстових описів завдань проєкту, забезпечує краще розуміння завдань командою та підвищує ефективність виконання проєкту. Використання штучного інтелекту, що включає великі мовні моделі, і стабільні алгоритми розподілу в процесах управління, сприяє автоматизації та ефективності роботи з проєктними завданнями спринту, що підвищує продуктивність і згуртованість команди. Результатом дослідження стала інформаційна технологія, яка заснована на інтеграції штучного інтелекту при плануванні спринту, розподілі завдань і управління ризиками. Застосування запропонованої інформаційної технології має значний потенціал для підвищення гнучкості, ефективності та загального успіху проєкту. Розроблена інформаційна технологія враховує контекст проєкту та думки експертів, що робить її гнучкою та адаптивною до специфіки конкретного проєкту та характеристик команди, що важливо для подальшого вдосконалення процесів управління проєктами. Інформаційна технологія для інтелектуального планування роботи команди ІТ-проєкту дозволить оцінити та зменшити негативний вплив факторів, що загрожують термінам і якості проєкту, шляхом аналізу історичних даних і моделювання поведінки команди.

Ключові слова: інтелектуальне планування, інформаційні технології, велика мовна модель, метод, модель, ІТ-команда, управління проєктами, стабільний.

Introduction. When managing IT projects, agile or adaptive management methodologies are the most common. Agile methodologies have become the main approach to IT project management due to their ability to adapt to changes, increase team efficiency, and deliver quality results. The agile approach is based on an iterative model that focuses on constant communication between team members, customers, and other stakeholders. Flexibility in planning and adaptation allows teams to cope more effectively with the challenges of the modern IT environment. Scrum is one of the most popular agile methodologies [1]. Scrum is widely used due to its ability to quickly adapt to changes, increase transparency in team work, and focus on delivering value to the customer. The Scrum methodology provides flexibility, promotes effective collaboration, and helps teams adapt to changing project conditions and requirements. However, even within Scrum, there are factors that can affect project success. These include unclear task formulation, insufficient team communication, and problems with task

distribution among performers. These factors significantly affect the quality of project planning and implementation, so it is important to create a mechanism for planning the work of the IT project team when applying an agile project management methodology. By implementing this mechanism, the project team will be able to reduce the impact of these factors on project performance and increase team productivity.

Literature review. Information systems and task management tools are used to implement Agile principles. These tools are based on agile methodologies and provide effective communication, progress monitoring, and flexibility in IT project management. The choice of a particular tool depends on the project needs, team size, task complexity, and budget. Let's take a look at the most popular systems.

Jira [2], developed by Atlassian, is a powerful project management tool in the context of Agile methodologies. It allows teams to plan sprints, track

progress, manage tasks, and integrate with other development tools. Jira offers the flexibility to customize workflows and generate reports, making it ideal for a variety of projects.

The visual tool Trello [3], also from Atlassian, allows a team to manage various projects and workflows, as well as track tasks. Trello uses a visual approach to task management with boards and cards. It's easy to use and convenient for smaller teams and projects.

Another product and project management tool designed for effective collaboration between teams is Asana [4]. With the help of this tool, teams plan, track, and manage work when managing projects and tasks. The functionality includes the creation of projects, tasks, subtasks, as well as the ability to comment and attach files, which facilitates collaboration.

Microsoft Teams is a communication and collaboration tool integrated with other Microsoft products [5]. It supports video conferencing, chats, file sharing, document collaboration, and other IT team management tools, making it a popular choice for corporate environments.

The analysis showed that, despite their popularity, the considered information systems lack a mechanism for generating recommendations for the qualitative selection of project sprint tasks and effective distribution among project executors. On the other hand, such systems offer the possibility of accounting for work performance, time tracking, which allows you to collect a lot of data on the project management process.

Many researchers have studied the issues of IT team planning. Some of them address the issue of high-quality planning and execution of project tasks by analyzing surveys of project team members. Based on a Grounded Theory study involving 21 participants from six different companies, [6] presented the challenges and limitations associated with the practice of agile project management in the context of a self-organized team. The study identified eight key project management challenges that arise from self-organized Agile teams at different levels.

The authors of [7] conducted a study based on the grounded theory method using a mixed-methods approach. The key contribution of this study is the creation of a mixed-methods grounded theory on the role of the project manager. Data was collected from a variety of sources, including over 45 hours of interviews with 39 software development professionals, as well as quantitative data from questionnaires completed by 57 respondents. This research highlights the continued presence of the project manager role in agile software projects as part of the shift from traditional to agile ways of working.

Researchers [8] conducted a survey of 477 respondents from 71 Agile teams in 26 companies, and the data were analyzed using structural equation modeling. A positive impact of teamwork quality on team productivity was found when assessed by team members and their leaders. However, there was a negligible effect when team performance was assessed by product owners. The impact of teamwork quality on learning and job satisfaction of

team members was significant and positive, but was assessed exclusively by team members themselves.

Some researchers are improving and developing additional features in existing project management systems to improve the quality of project planning and communications. The authors of [9] proposed the Emotimonitor application for Trello, which is designed to collect information about the emotional states of team members in the context of their technical tasks through a user-friendly interface. Emotimonitor allows team members to better express their emotional states through emoji reactions on Trello cards, and provides team leaders with a dashboard that summarizes these reactions in the form of visualizations and statistics. The tool is extensible and has the potential to become a channel for team members working in Agile environments to better express their emotional states.

The results of the study [10] emphasize the need to integrate flexible methodologies (Agile, Scrum) and information systems such as JIRA, Trello, and others to ensure effective project management in the context of BANI (Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible). It highlights the importance of continuous learning and competency development of both technical and soft skills for successful IT project management. The study provides important practical recommendations for IT project managers working in a BANI environment, helping to improve their ability to adapt to new challenges and achieve successful results.

Information technology allows not only to successfully perform project management tasks but also to ensure effective communication between project members. This is due to the fact that many different unforeseen situations, challenges, and threats arise during communication between project team members that require a response from the project manager and team leaders. In [11], the authors propose improving information technology with Jira Software, Jira Service Desk, and Confluence tools, as well as suggestions for improving the structure of internal project communications by optimizing its time performance.

Other authors in their studies focus on the importance of the social aspect when planning the work of a project team.

Paper [12] study focuses on examining the relationship between personality traits and favorable team climate in the context of a telecommunications company. In two replication iterations across geographically dispersed divisions of a telecommunications company, the researchers interviewed members of 19 teams (12 teams in the first iteration, seven teams thereafter). Using correlation analysis and meta-analysis, the survey data were used to identify relationships between personality traits and team climate factors. The authors used regression analyses to determine which personality traits were significant predictors of team climate factors. They suggest that organizations provide support and training to increase the level of integrity of team members. Increasing integrity should promote persistence in achieving team goals and completing tasks.

Based on the theory of social interdependence, the authors of [13] developed a model to study team behavior in the context of Enterprise Systems (ES) implementation. In particular, the interdependence of goals across multiple ES projects promotes inter-team behaviors such as monitoring between ES project teams and adaptability of ES project teams, which in turn leads to higher levels of implementation effectiveness. The model is supported by data from a sample of key stakeholders in recent ES implementations in small and medium-sized Chinese enterprises. Interdependent goals allow for a certain degree of functional independence while achieving goals that are important to the organization as a whole

The global virtual team has become the basis for collaborative work in the modern work environment, which is characterized by cross-border collaboration through digital technologies. The study examines the mechanisms of effective teamwork through information and communication technologies (ICT), while not taking into account the important social context in which this collaboration takes place. To fill this research gap, the study [14] proposes the use of social capital as a multidimensional mediator between ICT use and team effectiveness.

Some researchers consider the activities of an IT project team based on requirements and competencies. Collaboration and teamwork is a unique form of human activity that involves interdependence and shared responsibility for achieving goals and accomplishing tasks, as well as the ability to perform tasks and communicate effectively. Article [15] discusses the selection of a project team, including a project manager, based on an accepted profile of requirements and competencies on the example of an international project.

Article [16] proposes a method of multi-criteria ranking of candidates for a project team, which, unlike existing methods, uses fuzzy ideas about the preferences of candidates when assessing the generalized competence of each candidate based on comparisons with the reference competence, which allows improving the ability to evaluate candidates. Article [17] discusses an example of using the proposed method to solve the problem of selecting candidates to further solve the problem of forming an IT project team under conditions of uncertainty.

The authors of [18] propose a conceptual model of competencies for the success of IT projects, which consists of four interrelated competencies, namely: the emotional state of the project team; social status; cognitive and managerial abilities. To analyze the success of an IT project, a benchmark assessment is used to identify problematic competencies and plan the necessary corrective actions to develop the missing project competencies at the project initiation stage. The typical work structure presented in the article allows for the successful implementation of IT projects.

The analysis of the conducted research has shown that existing approaches to planning the work of an IT project team mainly focus on improving project management information systems, using survey methods, and assessing the competencies of team members. At the

same time, shortcomings in the formulation of sprint tasks or errors in the distribution of performers can lead to misunderstandings and failures in the implementation of project tasks. Therefore, it is necessary to take into account the uncertainties and risks inherent in agile methodologies by applying an integrated approach using natural language processing techniques. The development of information technology that uses large language models (LLMs) and stable distribution algorithms will automate management processes, increase task efficiency, and contribute to the coordinated and productive work of the IT project team.

Purpose and objectives of the study. The purpose of this study is to reduce the impact of project risk factors on the successful completion of the project by introducing information technology for intelligent planning of the IT project team's work based on the Agile methodology. This technology will provide an opportunity to improve the formulation of tasks performed during sprints and optimize their distribution among project team members. The technology will automate the analysis of information, identify possible problems, and generate recommendations for describing and distributing tasks to the project team. The introduction of this information technology can reduce risks and increase the efficiency of project management.

Research methodology. The information technology for intelligent planning of the IT project team's work, which is being developed in this study, allows, based on the collection and processing of information from project documentation and data collected in the project management tracking system, to ensure the timely completion of sprint tasks and reduce the risks of ambiguity in the perception of tasks and mismatch of the team's qualifications and interests. The proposed information technology implements a set of data processing functions based on the models and methods proposed in the authors' previous works, namely:

1. A method of intelligent planning of the IT project team's work that facilitates faster and more accurate sprint planning by analyzing retrospective data and using an artificial intelligence model to provide recommendations to the project manager and team [19]

2. Model for evaluating the textual description of the project sprint task [20].

3. A method of improving textual descriptions of tasks that allows to increase the accuracy of task perception and reduce the risk of task failure by using machine learning and LLM models to evaluate and improve the text [21].

4. Models for distributing sprint tasks between performers based on the task of determining stable mappings that take into account the specifics of the agile project management methodology and improve the distribution of tasks among project team members [22].

5. The method of generating recommendations for planning the work of an IT project team defines recommendations for describing tasks and assigning tasks based on the intelligent processing of retrospective data,

textual data, and project context and allows you to take into account the risks inherent in projects with an agile methodology [22].

The conceptual model for planning the work of an IT project team is shown in fig. 1.

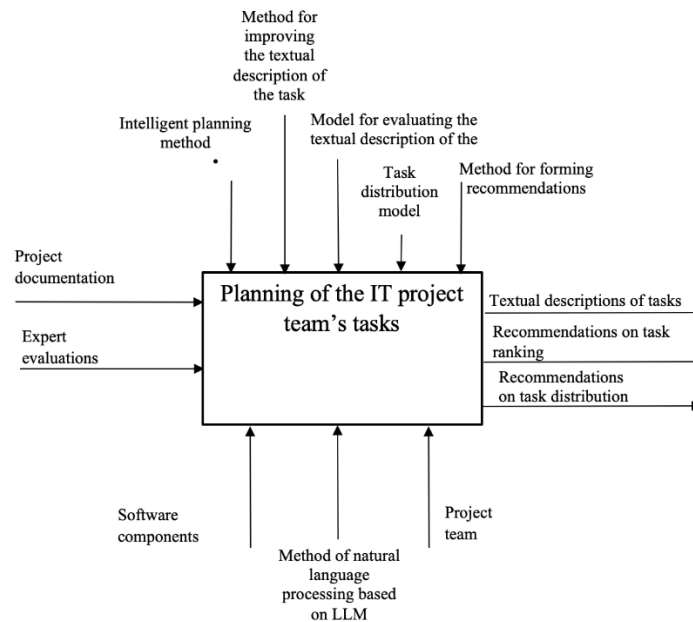


Fig. 1. Conceptual model for planning the work of an IT project team

The input data in the conceptual model are: project documentation and expert opinions. The project documentation includes, among other things, retrospective data on project sprint task descriptions downloaded from the task management system and the project task hierarchy [20]. Expert assessments are used to evaluate the quality of sprint task formulations and the distribution of tasks among project performers, taking into account information about performers' competencies, qualifications, skills, and preferences.

The initial data for information technology are:

- a textual description of the tasks that satisfies the project team (with an assessment of the text's perception);
- recommendations for ranking sprint tasks to prioritize the further distribution of tasks among performers;
- recommendations and options for distributing sprint tasks for the project team.

The main functions of the information technology for intelligent planning of the IT project team are related:

- with collecting, cleaning, and storing project sprint data;
- improving the description of tasks;
- creating options for describing tasks for the project team;
- providing recommendations on the distribution of tasks among executors.

These functions are realized with the help of software components that implement complex algorithms for classification and clustering, natural language processing, generative intelligence, sustainable matching, etc.

The decomposition of the conceptual model for planning the work of the IT project team is presented

using the IDEF0 functional modeling methodology [23, 24] and is shown in fig. 2.

Let's look at the key functions of information technology. First of all, let's pay attention to the function related to the implementation of collecting, cleaning, and describing tasks in the task management system. This process is important for organizing and controlling project development processes. Fixing all the information in the tracking system creates a convenient environment for teamwork, improves communication, and ensures that all project participants fully understand the tasks. To increase the perception of task descriptions by the project team, textual task descriptions are processed using machine learning algorithms and expert assessments. The tasks are evaluated by experts, which allows for independent labeling of the data set for binary classification. Positive tasks include tasks with high quality descriptions that are understandable to the expert and the time estimate for them is most likely to be adequate. Tasks that are incomprehensible to the expert receive negative marks. The assessment of the quality of the wording is determined by the level of the expert's awareness of the specifics and context of the project, while increasing the number of experts has almost no effect on the result [20]. Adding wording assessments during the sprint retrospective to train the classifier model and involve project team members as experts is appropriate.

The results of experiments [20] indicate the need to include experts with a deep understanding of the project to develop an effective classification model aimed at assessing the quality of textual descriptions of sprint tasks. The effectiveness of such a model largely depends on the correct choice of the vectorization method and the adaptation of the classification model [25] to the specifics of the data obtained from the tracking system.

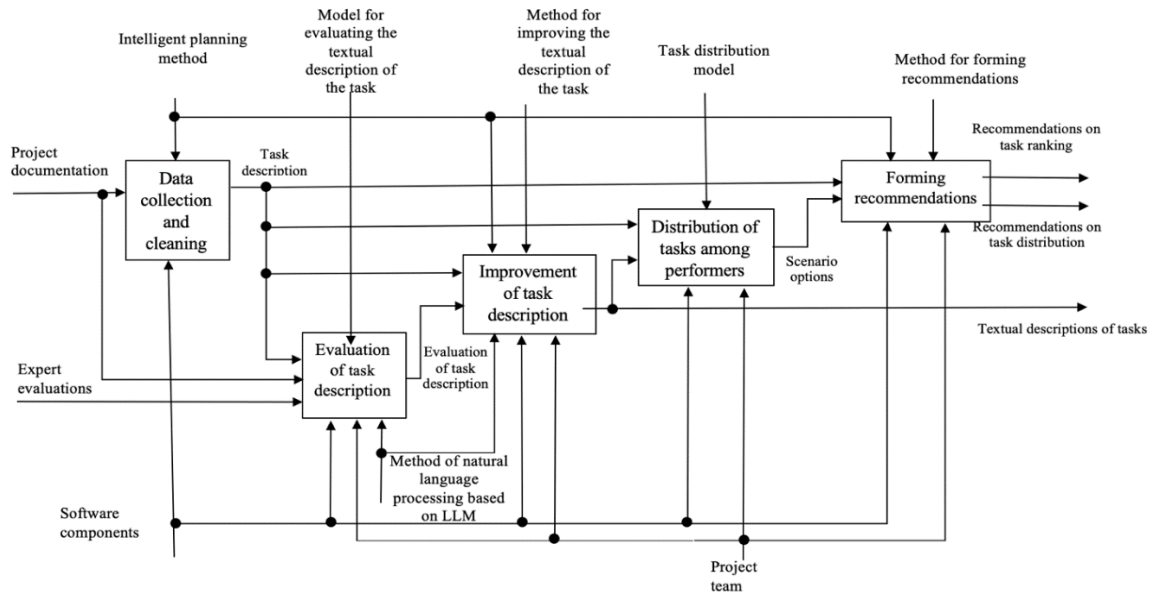


Fig. 2. Decomposition of information technology functions for intelligent planning of the IT project team based on an agile methodology (IDEFO)

Based on the results obtained in [21], we can conclude that some tasks can indeed be dramatically improved for understanding with the help of LLM. They can be used in the work of a project manager to formulate sprint tasks and improve team efficiency through the linguistic features of tasks. With this approach, the project manager chooses the wording options for the task description, which the LLM evaluates and assigns points based on its clarity and comprehensibility. The project manager can use these recommendations to improve the task description for the project team [22]. When creating a project product backlog or project sprint, the project manager is given two options to choose the most favorable task description. To do this, they need to review and reformulate the task descriptions of the sprint to reduce project risks and increase the quality of project execution.

The distribution of tasks in a project sprint between performers can affect the fulfillment of project sprint tasks. This may be due to a lack of qualified performers or switching performers to other specific tasks. To avoid these situations, methods of finding stable pairings are used. According to the research results, the algorithms of stable pairings EADAM [26] and SOSM [27] are the most effective. They ensure the distribution of tasks in a sprint, meet the requirements of developers, and are characterized by low computational complexity. Based on these algorithms, the project manager receives a stable mapping based on the prioritization of tasks and the qualifications of performers, which allows them to successfully complete the project sprint tasks.

The functions related to the formation of recommendations to the project team on prioritizing project sprint tasks and their effective distribution allow to increase the efficiency of project implementation, taking into account the risks of inaccurate task assessment or understanding of their essence.

The developed information technology takes into account the project context and expert opinions, which

makes it flexible and adaptive to the specifics of a particular project and team characteristics, which is important for further improving project management processes.

To analyze the impact of the risks associated with the failure to complete tasks in a project sprint, the failure rate per unit of time is used to assess the reliability and efficiency of the workflow [28]. The recommendations applied by the project manager help reduce the number of failures, increase the stability and accuracy of tasks, and ensure the successful completion of the project. The use of a failure rate indicator allows you to track changes in risk exposure and evaluate the effectiveness of implemented management measures. Thanks to this indicator, it is also possible to analyze the effectiveness of using the proposed information technology for planning the work of the IT project team in the face of uncertainty and risks arising during project management.

Analysis and discussion of results. The developed information technology is aimed at improving the efficiency of task management and increasing the productivity of project teams. This technology interacts with existing task tracking tools, such as JIRA, and provides two main functions:

- checking, evaluating, and improving the tasks planned for the sprints;
- recommendations on how to effectively distribute tasks among team members based on their skills, using LLMs to analyze project sprint task descriptions.

Previous studies [19-22] have shown that the risks associated with task ambiguity and skill mismatch can hinder project success. By implementing information technology that improves task clarity and offers task allocation, these risks can be reduced, increasing employee satisfaction and project team productivity.

A project by the company Dominet was considered to assess the effectiveness of implementing information

technology. To evaluate the results of the information technology implementation, performance evaluation experiments were conducted for a small team (up to 5 developers) and a medium team (6-15 developers) during four sprints. The project involved the development of a

standard e-commerce platform, which ensured consistency and controllability of the experimental conditions.

The obtained data on key indicators before and after the implementation of the developed technology are shown in tab. 1-4. Metrics for a small team (up to 5 developers) are shown in tab. 1.

Table 1 – Metrics results for a small team

Metric name	Value before	Value after implementation
Defect rate (defects per task)	0,08	0,05
Schedule performance index (SPI)	1,00	1,03
Productivity (tasks for the developer)	5	6
Acceptance rate of recommendations (%)	N/A	75
Acceptance rate of task distribution (%)	N/A	85

Changes in metrics during the four sprints for a small team (up to 5 developers) after the introduction of information technology shown in tab. 2.

Changes in metrics during the four sprints after the introduction of information technology for a medium team (6-15 developers) are shown in tab. 4.

Metrics for a medium team (6-15 developers) are shown in tab. 3.

Table 2 – Changes in metrics during the four sprints of information technology implementation

Sprint number	The level of defects	SPI	Productivity	Acceptance rate of recommendations (%)	Acceptance rate of task distribution (%)
1	0.07	1.01	5.5	65	80
2	0.06	1.02	5.8	70	83
3	0.05	1.03	6.0	77	86
4	0.04	1.04	6.2	80	90

Table 3 – Metrics for a medium team before and after the implementation of information technology

Metric name	Metric value before implementation	Metric value after implementation
Defect rate (defects per task)	0.12	0.09
Schedule performance index (SPI)	0.97	0.99
Productivity (tasks for the developer)	4	4.5
Acceptance rate of recommendations (%)	N/A	65
Acceptance rate of task distribution (%)	N/A	78

Table 4 – Changes in metrics during the four sprints after the introduction of information technology

Number sprint	The level of defects	SPI	Productivity	Acceptance rate of recommendations (%)	Acceptance rate of task distribution (%)
1	0,11	0,97	4,2	55	72
2	0,10	0,98	4,4	60	75
3	0,09	1,00	4,6	68	80
4	0,08	1,01	4,8	75	85

An analysis of the dynamics of defect rates and project team productivity leads to the following conclusions. The indicators have significantly decreased in both cases, which indicates a positive impact on the quality of the tasks performed. The teams improved their schedule adherence, which indicates effective planning due to the introduction of technology. The number of completed tasks per developer increased in both teams. The adoption rate increased over time, demonstrating the teams' adaptation to the technology.

an IT project team based on the principles of an agile methodology. This technology provides the project team with a mechanism for effective management in the face of risks. It uses data from the project management tracking system, applying LLM-based natural language processing techniques that provide recommendations for formulating sprint tasks, as well as stable matching algorithms that offer recommendations for effective distribution among project team members. The use of modern approaches to natural language processing, including LLM, automates and improves task processing, which in turn increases productivity and team cohesion. The developed information technology for intelligent planning of the IT project team's work allows assessing and reducing the negative impact of factors that threaten the project's timing and quality by analyzing historical data and

Thus, we can conclude that the proposed information technology has been successfully tested, which makes it possible to recommend its implementation for planning the work of small and medium-sized IT project teams.

Conclusions. Thus, in this paper, we have developed an information technology for intelligent work planning of

modeling team behavior. The proposed models can be easily integrated into popular task tracking systems (Jira, Trello), allowing you to automatically identify problematic tasks and achieve efficiency gains.

References

1. The Scrum Guide. *The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. Available at: <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf#zoom=100> (accessed 12.12.2024).
2. Jira Software. [Electronic resource] - 2024. Available at: <https://www.atlassian.com/software/jira>. - 10.05.2024.
3. Atlassian Trello. [Electronic resource] - 2024. Available at: <https://trello.com> (accessed 15.11.2024).
4. Asana Available. [Electronic resource] - 2024. Available at: <https://asana.com> (accessed 10.11.2024).
5. Microsoft Teams. [Electronic resource] - 2024. Available at: <https://www.microsoft.com/> (accessed 15.11.2024).
6. Rashina Hoda, Latha K. Murugesan. Multi-level agile project management challenges: A self-organizing team perspective. *Journal of Systems and Software*. Volume 117, July 2016, Pages 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.02.049>
7. Y. Shastri, R. Hoda, R. Amor. The role of the project manager in agile software development projects. *Journal of Systems and Software*. Vol. 173, March 2021, 110871 <https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110871>
8. Y. Lindsjorn, Dag I.K. Sjøberg. Teamwork quality and project success in software development: A survey of agile development teams. *Journal of Systems and Software*. Volume 122, December 2016, Pages 274-286. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.09.028>
9. M-Amr Abd El Migid I, Damon Cai I, Thomas Niven I, Jeffrey Vo I, Kashumi Madampe, John Grundy, Rashina Hoda. Emotimonitor. A Trello power-up to capture and monitor emotions of Agile teams. *Journal of Systems and Software*. Vol. 186, April 2022, 111206. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111206>
10. Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Bushuieva, V., Bushuiev, D. Integrated Intelligence Model for Managing IT Projects. CEUR Workshop Proceedings, 2022, 3382, p.1-11. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223578>
11. Svintsitskaya O. M., Sugonyak I. I., & Puleko I. V. (2021). Business process optimization based on information technology in IT project communications. *Technical Engineering*, (1(87), 59-65. [https://doi.org/10.26642/ten-2021-1\(87\)-59-65](https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-59-65)
12. Sai Datta Vishnubhoda Emilia Mendes. Exploring the relationship between personality traits and agile team climate: Aggregating results from a twice replicated study in a telecom company. *Journal of Systems and Software*. Vol. 210, April 2024, 111937 P.1-27. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111937>
13. James J. Jiang a, Gary Klein b, Jamie Y.T. Chang. Teamwork behaviors in implementing enterprise systems with multiple projects: Results from Chinese firms. *Journal of Systems and Software*. Vol. 157, November 2019, 110392. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2019.110392>
14. Tim Heubeck, Anne-Sophie Storz, Reinhard Meckl Success factors of global virtual teamwork: A social capital perspective. *Digital Business*. Volume 4, Issue 2, December 2024, 100081 P.1-15. <https://doi.org/10.1016/j.digbus.2024.100081>
15. Edyta Kulej-Dudek. Project management in a partner network in the context of teamwork and project team selection. *Procedia Computer Science*. Volume 225, 2023, Pages 4850-4859. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.485>
16. Kononenko, I., Sushko, H., Babayev, I., & Abdullayev, R. (2024). Solving the problem of ranking applicants for a project team with fuzzy assessment of competencies and requirements. *Radioelectronic and Computer Systems*, No. 2, 230-243. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.18>
17. Sushko G. V., & Balandin D. S. (2023). Development of information technology for the formation of an IT project team. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, No. 1(7), 76-80. <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2023.7.10>
18. Bushuyev, S., Bushuyeva, N., Bushuieva, V., Bushuiev, D., Ivko, A. Competencies Model for the Socialization of Artificial Intelligence Systems. CEUR Workshop Proceedings, 2023, 3641, pp. 83-95.
19. Rohovyi, M., & Grinchenko, M. Project team management model under risk conditions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management*, 2023, No. 1(7). DOI: 10.20998/2413-3000.2023.7.1
20. M. Grinchenko, M. Rohovyi, A model for identifying project sprint tasks based on their description, *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, Kharkiv, 2023, No. 4 (26), pp. 33-44. DOI: [https://doi.org/10.30837/bi.2024.2\(101\).09](https://doi.org/10.30837/bi.2024.2(101).09)
21. Towards the improvement of project team performance based on large language models / M. Rohovyi, M. Grinchenko // *Radioelectronic and computer systems*, 2024, No. 4(112), pp. 229-247.
22. Rohovyi M., Grinchenko M. Comparative Analysis of stable matching algorithms for intelligent work planning of IT teams Bionics of intelligence. Kharkiv.: NURE. No. 2(101), 2024. p. 56-63. DOI: 10.30837/bi.2024.2(101).09
23. ISO/IEC/IEEE 31320-1:2012 Information technology - Modeling languages - Part 1: Syntax and semantics for IDEF0 [ISO/IEC/IEEE 31320-1:2012 | IEC](https://www.iso.org/standard/60615.html)
24. International Organization for Standardization. (2019). Information technology - Modeling Languages - Part 1: Syntax and Semantics for IDEF0 (ISO Standard No. 31320-1). <https://www.iso.org/standard/60615.html>.
25. A. Briciu, G. Czibula, M. Lupe (2023). A study on the relevance of semantic features extracted using BERT-based language models for enhancing the performance of software defect classifiers. *Procedia Computer Science*. Vol. 225, P. 1601-1610. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.149>
26. Diebold, F., Aziz, H., Bichler, M. et al. Course Allocation via Stable Matching. *Business & Information Systems Engineering*, 6, pp. 97-110 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0316-6>
27. Zhenhua Jiao, Ziyang Shen. School choice with priority-based affirmative action: A responsive solution. *Journal of Mathematical Economics*. Vol. 92, January 2021, Pages 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmateco.2020.10.007>
28. Jens Schmidt Mitigating risk of failure in information technology projects: Causes and mechanisms. *Project Leadership and Society*. Volume 4, 2023, 100097, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2023.100097>.

Received (надійшла) 15.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Гринченко Марина Анатоліївна (Grinchenko Marina) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, м. Харків, Україна; e-mail: marinagrunchenko@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8383-2675>

Роговий Микита Антонович (Rohovyi Mykyta) – аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: nikrogovoy@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7902-3592>

Грінченко Євген Миколайович (Grinchenko Evgen) – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії з проблем інформаційних технологій та протидії злочинності у кіберпросторі, Харківський національний університет внутрішніх справ, Харків, Україна; e-mail: gengrinchenko@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3973-9078>

M. GRINCHENKO, M. SHAPOSHNIKOV

ANALYSIS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS' PERFORMANCE INDICATORS BASED ON QS WORLD UNIVERSITY RANKINGS ASSESSMENT

In the modern context of globalization and increasing competition among universities, a key factor for the successful development of higher education institutions (HEIs) is the ability to accurately assess their performance. This study provides a review of research related to global ranking assessments and performance management of HEIs using key performance indicators (KPIs), substantiating the relevance of this research. The aim of the study is to improve the system of key performance indicators (KPIs) at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"), which will contribute to enhancing the quality of educational services and improving the university's position in international rankings. The task of the study is to establish the relationship between the planned target indicators defined in the university rector's contract and the QS World University Rankings (QS-WUR) indicator system, which influences the institution's position in this global university ranking. Based on an analysis of NTU "KhPI" performance according to the QS-WUR methodology, an approach for formalizing the QS-WUR indicators that determine its ranking position is proposed. The developed model for forming QS-WUR ranking indicators for NTU "KhPI" explains who provides the information for calculating each indicator and illustrates the interconnections between these indicators in the university evaluation process. The study also formalizes the performance results of NTU "KhPI," which are annually published on the university's official website and calculated based on the performance indicators of its institutes, departments, and other units. This comprehensive approach to evaluating university performance allows for the identification of strengths and weaknesses in managing scientific and international activities and organizing the educational process. The implementation of the improved KPI system at NTU "KhPI" will facilitate the optimal allocation of resources, the introduction of innovative approaches in academic, research, and international activities, and, in turn, ensure high standards of education quality and international recognition of the university.

Keywords: key performance indicators, management, model, indicator system, ranking, QS World University Rankings, resource allocation, information system.

M. А. ГРИНЧЕНКО, М. І. ШАПОШНИКОВ

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ QS WORLD UNIVERSITY RANKINGS

У сучасних умовах глобалізації та зростаючої конкуренції між університетами ключовим фактором успішного розвитку закладів вищої освіти (ЗВО) є здатність точно оцінювати свою ефективність. У роботі проведено огляд досліджень, які пов'язані із світовим рейтинговим оцінюванням та управлінням ефективністю діяльності ЗВО з використанням КРІ, обґрунтовано актуальність дослідження. Метою дослідження є удосконалення системи ключових показників ефективності (КРІ) у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), що сприятиме підвищенню якості освітніх послуг та покращенню позицій у міжнародних рейтингах. Завданням роботи є встановлення зв'язків між плановими цільовими показниками, визначеними у контракті керівника університету, та системою показників QS-WUR, які впливають на позицію ЗВО у цьому світовому рейтингу університетів. На основі аналізу ефективності діяльності НТУ «ХПІ» відповідно до методики QS World University Rankings (QS-WUR) запропоновано підхід щодо формалізації показників QS-WUR, які визначають його позицію у рейтингу. Розроблена модель формування показників рейтингів QS-WUR для НТУ «ХПІ» пояснює, хто та як надає інформацію для розрахунку кожного показника, а також відображає взаємозв'язки цих показників у процесі оцінювання університету. Проведено формалізацію результатів діяльності НТУ «ХПІ», які щорічно оприлюднюються на офіційному сайті університету та розраховуються на основі показників роботи інститутів, кафедр та інших підрозділів. Це забезпечує комплексний підхід до оцінювання ефективності діяльності університету, дозволяє визначити його сильні та слабкі сторони в управлінні науковою та міжнародною діяльністю та в організації освітнього процесу. Впровадження вдосконаленої системи КРІ у НТУ «ХПІ» буде сприяти оптимальному розподілу ресурсів, запровадженню інноваційних підходів у навчальну, наукову та міжнародну діяльність, що, своєю чергою, забезпечить високі стандарти якості освіти та міжнародне визнання університету.

Ключові слова: ключові показники ефективності, управління, модель, система показників, рейтинг, QS World University Rankings, розподіл ресурсів, інформаційна система.

Introduction. In the strategy for the development of higher education in Ukraine for 2022-2032, one of the main challenges for higher education institutions (HEIs) is the improvement of KPIs that characterize the position of HEIs in global rankings. The impact of global rankings on the strategic development of HEIs is significant and substantial. This is due to the following aspects. Firstly, high positions in global and national rankings strengthen the reputation of HEIs, contributing to the attraction of the best students and recognized scientists from around the world. Secondly, the desire to improve their ranking positions encourages HEIs to review and optimize internal processes in educational, research, and international activities. For this, HEI management needs to engage in strategic planning and adapt to the changing conditions of the global education market to effectively allocate resources and determine priority areas for development to

improve the HEI's ranking positions. Researchers and practitioners pay attention to the analysis of KPIs as a tool for assessing HEI performance and enhancing the ranking of Ukrainian education. The use of KPIs is becoming crucial in managing the efficiency of HEIs.

Analysis of research and publications. Currently, the leading global academic university rankings include QS World University Rankings (QS-WUR), Times Higher Education (THE) World University Rankings, Academic Ranking of World Universities (ARWU), and Leiden Ranking [1]. They play a key role in determining the international reputation of higher education institutions.

The QS-WUR ranking [2] considers academic and employer reputation, which accounts for a significant portion of the overall score (a combined 50%). The Times Higher Education ranking [3] uses reputation surveys to

assess the quality of teaching and research, providing a systematic view of academic reputation. These rankings reflect the subjective evaluation of education and research quality provided by a broad pool of respondents, and therefore, they can influence the perception of universities at the international level. Since they are largely dependent on respondent opinions, the results of such rankings are influenced by subjective factors [4-5].

The authors of the study [6] propose key changes in the QS-WUR ranking methodology, which have significantly impacted the positions of HEIs. The main changes concern data collection and evaluation methods, particularly reputation surveys and faculty-related indicators. The study results showed that these changes led to significant shifts in university rankings, sparking debates about the transparency of the methodology. The drawback of this approach is that the changes may have negatively affected universities that traditionally held strong positions but experienced a ranking decline due to methodological adjustments.

The study [7] presents a predictive model for assessing university competitiveness in the QS-WUR ranking using statistical methods and machine learning algorithms. The model allows for accurate forecasting of university performance, which can be useful for improving strategies aimed at attracting top students, faculty, and funding. The results showed a low prediction error, making the model highly reliable. However, a disadvantage of the approach is the difficulty in adapting the model to new ranking changes and the need for continuous algorithm and data updates.

Key research on the methodology and impact of ARWU, also known as the Shanghai Ranking, has been reviewed [8]. ARWU evaluates universities based on the number of Nobel laureates and Fields medalists among alumni and faculty, the number of publications in prestigious journals, and citation levels. ARWU is one of the most influential international university rankings, focusing on academic and research achievements such as the number of publications in high-ranking journals, the number of Nobel laureates among faculty and alumni, and other scientific indicators. The analysis of scholarly works highlights the key advantages of this ranking, particularly its objective evaluation criteria, as well as its drawbacks, such as underestimating educational indicators and giving less attention to the humanities.

The study [9] conducted a graphical comparison of global university rankings, emphasizing that ARWU (Shanghai Ranking) is the most stable indicator of university research activity. At the same time, THE and QS-WUR rankings rely heavily on reputation surveys, which leads to underestimation of universities with high research performance and overestimation of universities with less developed research activities. The results showed that the reputation component significantly influences university positions in THE and QS-WUR rankings, which can be considered a drawback of this approach. Meanwhile, ARWU focuses more on objective scientific criteria, making it more reliable for assessing research productivity.

The article [10] provides a critical analysis of the ARWU Shanghai Ranking methodology, particularly its impact on the "Big Five" South African research universities. The authors compare the performance of these universities in the context of international rankings and note that ARWU focuses on quantitative indicators of scientific activity, such as the number of publications and awards. The research results show that South African universities perform relatively well in ARWU due to their research achievements. However, the drawbacks of the approach include limited attention to educational activities and universities' social responsibility.

Leiden Ranking [11-12] employs bibliometric analysis, allowing the measurement of scientific publications and citations while considering research volume and quality. This ranking provides a more objective assessment of university research productivity but may underestimate other important aspects such as teaching quality and the social impact of HEIs.

Key research related to the methodology and impact of THE ranking [3] on universities has been reviewed. THE is one of the leading international rankings, based on a wide range of indicators such as teaching, research, internationalization, and citation impact. The analysis of scholarly literature will help identify the strengths and weaknesses of THE's methodology and understand how universities can use the ranking results to enhance their reputation and research activities.

The study [13] analyzes the impact of macroeconomic indicators, such as GDP and the Human Development Index (HDI), on university positions in THE rankings. The results indicate a significant correlation between these country-level characteristics and university scores in the ranking, suggesting that financial stability and socio-economic conditions can influence university quality and sustainability. However, the study has the drawback of not considering internal university factors, such as management and innovation, which can also affect rankings.

The author of the study [5] conducts a critical analysis of THE methodology, particularly concerning the citation metric. The paper raises concerns about potential distortions in assessments due to the use of fractional counting for certain scientific publications, which may inaccurately reflect university research productivity in benchmarking. The results show that this methodology can skew results for universities specializing in niche scientific disciplines. The drawback of this approach is that it does not consider alternative methods for improving citation counting.

The study [14] presents a visual analysis of THE university rankings using Tableau, allowing for a clear demonstration of the relationships between various indicators such as teaching, research, and citations. The research results indicate that data visualization facilitates a better understanding of the factors affecting university ranking positions. However, the drawback of the approach is that visualization does not always reveal all complex interdependencies between metrics and does not provide a deep analysis of potential factors that could improve university positions.

For universities to succeed, it is essential to focus on key HEI performance indicators that form the basis of these rankings [15]. Identifying and tracking these indicators enables universities to develop and adjust strategies to improve their positions in global rankings. The analysis of KPIs becomes an essential tool for university leaders in decision-making, enhancing their reputation in academic rankings, attracting resources, and expanding development opportunities in the dynamic educational environment. HEI KPIs directly influence their positions in international university rankings, as these indicators form the foundation for evaluating academic productivity, teaching quality, research activities, and international collaboration.

The study [16] analyzes KPIs used by foreign universities, particularly leading institutions in Europe and the United States. These indicators cover a wide range of activities, from student and faculty satisfaction levels to research achievements. For example, Harvard University demonstrates a high level of innovation activity, reflected in its KPIs. Partnerships with corporate research enable the university to collaborate closely with leading global companies. The significant volume of corporate research funding facilitates the implementation of cutting-edge scientific projects.

The authors of the study [17] define the concept of a "Creative University" and describe management practices aimed at improving KPIs. They establish that university KPIs consist of the Institutional Activity Index (IAP) and the Core Productivity Index (IMP), which are constrained by time and cost. The "Creative University" model ensures KPI attainment in a shorter period and at lower costs. The authors propose three key strategies for accelerating KPI improvement: minimizing the gap between IAP and IMP, efficient activity planning, and scheduling management according to academic phases. The main research findings demonstrate that these strategies can significantly enhance KPI performance. However, the drawbacks of the proposed approach include a high dependence on the accuracy of KPI definitions and the complexity of integrating management processes into the existing university structure.

The article [18] describes a KPI calculation system for faculty at the Eurasian National University. The research results show that the proposed system can accurately assess faculty productivity but has drawbacks, such as dependence on data accuracy and completeness. Additionally, the complexity of collecting and processing large amounts of information may impact the timely availability of results.

The authors of the article [15] explore the implementation of performance management systems, including KPIs, at Donetsk National University. The study identifies issues such as faculty resistance to KPI systems and the need for tools to improve acceptance and effectiveness. The authors provide recommendations for enhancing management culture and fostering productive dialogue, which can improve performance management efficiency. The main drawbacks include the necessity of changing management approaches and the difficulty of overcoming faculty resistance.

In the article [19], the authors investigate the strategy for optimizing the achievement of Indikator Kinerja Utama (IKU) at Jambi University. The authors found that IKU exceeded the target by 142.05% but did not show growth compared to the previous year. To address this issue, the study employs action research methods aimed at identifying key problems and developing optimization strategies for achieving IKU. The main strategies include improving Lecturer Performance Burden (LPB) management, providing incentives, and increasing faculty participation in research and other activities. The main findings indicate that the proposed strategies can effectively enhance KPIs. The drawbacks include the complexity of strategy implementation and the need for continuous monitoring.

The authors of the article [20] study the development of a KPI monitoring panel for higher education institutions in Indonesia using a single data source. The authors integrate data from various information systems into a single database, allowing for easy tracking of different indicators at the program, faculty, and university levels. The main findings of the study indicate that the monitoring panel significantly simplifies the process of tracking and analyzing KPIs. At the same time, the disadvantages include high dependence on the accuracy of the collected data and the complexity of integration with existing information systems.

Researchers in article [21] analyze the role of information technology in higher education through a KPI-focused model. A case study from the University of La Verne compares data from different institutions to develop a KPI-based model for measuring student expectations and satisfaction with technology in education. The main findings indicate that the proposed model helps institutions achieve continuous improvement of their strategic goals. The drawbacks include dependence on data quality and the need for continuous technology updates.

In the study [22], the authors highlight the absence of KPIs that universities could use to measure academic quality and achieve strategic goals. The authors propose the formation of KPIs based on faculty perception and emphasize their importance in guiding the development and improvement of HEIs. The main findings of the study show that incorporating faculty perceptions can significantly enhance the quality assessment process. The drawbacks include the complexity of collecting and analyzing subjective data.

Researchers in the study [23] propose the development of an integrated faculty profile system for KPI monitoring, focusing on KPIs that assess teaching quality. The authors used the extreme programming methodology to develop a system that interacts with university and ministry of education databases. The results showed successful implementation and testing of user stories, demonstrating the system's effectiveness. However, the drawbacks of the approach include the need for highly qualified users and potential integration issues with existing management systems.

The authors [24] address the problem of automating KPI calculation for university executive staff based on a

mathematical model and an evaluation algorithm for faculty and administrative staff performance, including an example of a scientific and methodological activity report. The study results indicate that automation can significantly improve the accuracy and speed of KPI evaluation. At the same time, the disadvantages include the complexity of developing and implementing algorithms, as well as the need for continuous data updates and adaptation to changes in evaluation methodology.

Some researchers analyze the existing performance evaluation system for private universities and propose a dual evaluation model that combines KPIs and competency-based assessment. The authors of the study [25] believe that this model will improve the efficiency and competitiveness of university faculty. The main findings of the study demonstrate that the proposed model takes into account the specific needs of private universities. The drawbacks include the complexity of system implementation and the need for staff training.

In the study [26], the authors explore a model for studying and measuring KPIs in HEIs. They analyze the use of KPIs to assess and improve the overall efficiency of HEIs using the example of the Institute for Statistical Research and Cairo University Research Institute. The study results show that the application of KPIs contributes to significant improvements in achieving HEI goals. At the same time, the authors identified challenges in implementing KPIs, such as the need to adapt existing processes to new requirements.

The authors of the article [27] examine the application of data mining techniques to identify relevant KPIs in higher education institutions. Using open university initiative data, they identify characteristics and target groups for each KPI. The main results indicate that data mining techniques significantly facilitate the identification and application of KPIs, improving university operations. However, the main drawback is the dependence on the quality and completeness of available data.

Researchers in the study [28] present KPIs for optimizing the environmental efficiency of HEIs using an environmental management system. They emphasize the importance of integrating environmental KPIs into management systems to improve sustainable development practices and achieve environmental goals. The implementation results of these KPIs at the Polytechnic University of Valencia showed that they could significantly enhance the institution's environmental efficiency. However, the challenge remains in integrating new KPIs into already existing management systems.

The authors of the article [29] investigate the use of learning analytics and KPIs in HEIs to improve high-level decision-making. They highlight the integration of learning analytics tools with KPIs to provide comprehensive recommendations for improving the learning process, increasing institutional efficiency, and enhancing strategic planning. The study results show that applying these approaches can significantly improve HEI management efficiency through data-driven decision-making. However, the disadvantages of the approach

include dependence on data quality and the need for significant resources for implementation.

Researchers in article [30] consider cognitive modeling as a tool for strategic analysis of the competitive status of IT companies. They emphasize that cognitive models allow for the effective identification of key factors influencing a company's competitiveness and predicting possible development scenarios. The study presents an example of building a cognitive model for an IT company, which enables the analysis of relationships between internal and external factors. The application of this approach revealed its significant potential for supporting strategic decision-making aimed at strengthening the company's competitive position. However, the authors note that the accuracy of cognitive modeling depends on the availability of high-quality data and requires considerable time for model construction and verification.

An analysis of global indices and rankings regarding the level and quality of higher education in Ukraine shows that several Ukrainian universities are included in major global rankings, but they do not occupy top positions. For Ukrainian HEIs to successfully improve their ranking positions, they need to focus on key aspects such as academic reputation, research, international activities, and more.

Several researchers analyze how KPIs can be used to monitor academic productivity, teaching quality, student satisfaction, and the achievement of strategic goals. For example, the above-mentioned articles discuss approaches to improving KPI monitoring and management in educational environments, as well as models for faculty evaluation based on KPIs. The main findings of these studies indicate that the implementation of KPIs can significantly improve efficiency management in educational institutions; however, it requires significant adaptation to the specific conditions and needs of each institution.

Thus, the analysis of scientific sources shows that KPIs are a powerful tool for assessing and managing HEI efficiency. Improving the KPI system and its planned values can enhance the adaptation of Ukrainian HEIs to participate in global university rankings and provide an opportunity to improve their ranking positions.

Aim and tasks of the study. The analysis of KPIs is one of the key elements in determining the competitiveness of HEIs at the national and international levels. In the modern context of globalization and increased competition among universities, the ability to accurately measure and evaluate performance has become a crucial component of HEI development. This includes assessing academic achievements, the quality of the educational process, research productivity, international collaboration, and the implementation of innovations. Defining KPIs allows for identifying the strengths and weaknesses of HEI activities, helping to formulate strategies for their improvement [31].

HEI quality policies aim to ensure the quality of educational services by improving the scientific-methodological, pedagogical, and methodological

expertise of the teaching staff, implementing innovative teaching technologies, strengthening the university’s material and technical base, utilizing advanced information technologies, and incorporating the results of fundamental and applied scientific research in accordance with market demands for educational services and labor market needs.

The objective of this study is to improve the HEI KPI system, which will contribute to the enhancement of educational service delivery and the university’s position in international rankings.

The task of this study is to establish the relationship between the planned target indicators of HEIs, as outlined in the contract with the head of the higher education institution, and the QS-WUR indicator system, which determines the university’s position in global university rankings.

Materials and methods. This study proposes the use of the QS-WUR ranking. This choice is justified by the fact that, unlike the existing major global rankings such as the Academic Ranking of World Universities (ARWU) and Times Higher Education (THE), the QS-WUR website [32] provides open access to the input data used to compile the ranking.

To analyze data from ARWU or THE, one must contact the respective company. QS-WUR strives to identify gaps and seek additional data and methodological clarifications to enhance the accuracy of its rankings. Starting from 2024, QS-WUR has identified five key areas that contribute to the classification of a world-class university. These areas include research and discovery, employability and outcomes, global engagement, learning experience, and sustainability. Each area and its associated indicators have a specific weight. Table 1 presents the areas and indicators of the QS-WUR ranking.

Table 1 – List of Indicators in the QS World University Rankings

Category	Category Weight	Indicator	Indicator Weight
Research and Discovery	50%	Academic Reputation	30%
		Citations per Faculty	20%
Employability and Outcomes	20%	Employer Reputation	15%
		Employment Outcomes	5%
Global Engagement	15%	International Student Ratio	5%
		Ratio of International Faculty to Total Faculty	5%
		International Research Network	5%
Learning Experience	10%	Student-to-Faculty Ratio	10%
Sustainability	5%	Sustainability	5%

Let us consider the formation of HEI indicators according to the QS-WUR methodology [32].

1. Academic Reputation – the most important component of the QS-WUR ranking, accounting for 30% of the university's overall score. This parameter is based on a global survey of more than 100,000 academic staff, who, through online questionnaires, name up to 10 universities they consider the best in their field of knowledge. Responses from the last five years are taken into account, with a lower weight assigned to data from four and five years ago. The responses are weighted by region and discipline to ensure an even distribution, and all scores are normalized to obtain the final score. This indicator is calculated using the formula

$$K_t^1 = \frac{\sum_{i=1}^n FA_i \cdot WA_i}{PA_t} \times 100\%, \quad (1)$$

where

K_t^1 – academic reputation score for the t-th period;

FA_i – number of positive reviews about the university from the i-th respondent, $i = \overline{1, n}$;

WA_i – weighting coefficient for the i-th respondent (depends on the respondent's authority in their field);

PA_t – total number of all positive reviews from respondents received by other universities for the t-th period.

This indicator reflects how the HEI is perceived in academic circles compared to other HEIs and considers the quality and impact of research, the level of teaching, and the university's academic reputation.

2. Employer Reputation – this indicator accounts for 15% of the QS-WUR ranking's overall score. It is based on an online survey of more than 50,000 employers worldwide, who name up to 10 universities whose graduates are the most competent. This indicator allows for assessing the preparedness level of graduates from specific educational institutions and is calculated using the formula

$$K_t^2 = \frac{\sum_{j=1}^m FR_j \cdot WR_j}{PR_t} \times 100\%, \quad (2)$$

where

K_t^2 – employer reputation score for the t-th period;

FR_j – number of positive reviews about the university from the j-th employer, $j = \overline{1, m}$;

WR_j – weighting coefficient for the j-th employer (depends on the employer's authority and influence in the relevant field);

PR_t – total number of all positive reviews from employers received by other universities for the t-th period.

This indicator reflects how employers evaluate

university graduates, particularly their knowledge, skills, and readiness for employment.

3. Faculty/Student Ratio – this parameter has a weight of 10% in the QS-WUR ranking. It determines the quality of education by measuring the ratio of students to faculty members. The data is provided by universities, and the calculation formula is simple. The higher this ratio, the better the quality of education is considered to be, and it is calculated using the formula

$$K_t^3 = \frac{R_t}{S_t}, \quad (3)$$

where

K_t^3 – faculty/student ratio for the t-th period;

R_t – total number of faculty members at the university for the t-th period;

S_t – total number of students enrolled at the university for the t-th period.

This indicator reflects the extent to which an individualized approach to education is ensured: the fewer students per faculty member, the more attention can be given to each student.

4. Citations per Faculty – an important indicator accounting for 20% of the university's overall QS-WUR ranking score. This metric is based on data from globally recognized scientometric databases, where the number of citations of research papers is divided by the number of faculty members. This parameter allows for assessing the global impact of a university's research and is calculated using the formula

$$K_t^4 = \frac{C_t}{SA_t}, \quad (4)$$

where

K_t^4 – number of citations per research article for the t-th period;

C_t – total number of citations of all university publications for the t-th period;

SA_t – total number of research articles published by university faculty and researchers for the t-th period.

This indicator evaluates the scientific impact and quality of university research by considering how frequently the university's academic papers are cited in other studies.

5. International Faculty Ratio – a parameter that accounts for 5% of the QS-WUR ranking. It is based on university-provided data regarding faculty citizenship. The calculation determines the proportion of international faculty as a percentage of the total number of faculty members. A high percentage of international faculty reflects the global attractiveness and diversity of the institution and is calculated using the formula

$$K_t^5 = \frac{IR_t}{R_t}, \quad (5)$$

where

K_t^5 – proportion of international faculty for the t-th period (%);

IR_t – number of international faculty members (who are citizens of other countries) for the t-th period;

R_t – total number of faculty members at the university for the t-th period.

This indicator reflects the internationalization of the university's faculty, which is an important factor in creating a multicultural academic environment and enhancing the quality of education and research.

6. International Student Ratio – a parameter with a weight of 5% that reflects the university's international attractiveness. Universities provide data on student citizenship, and the proportion of international students is calculated as a percentage of the total student population. This indicator assesses the level of internationalization of the student body and is calculated using the formula

$$K_t^6 = \frac{IS_t}{S_t}, \quad (6)$$

where

K_t^6 – proportion of international students for the t-th period (%);

IS_t – number of international students (who are citizens of other countries) at the university for the t-th period;

S_t – total number of students enrolled in the HEI for the t-th period.

This indicator demonstrates how attractive the HEI is to students from different countries, which is an important aspect of creating an international academic environment and fostering cultural exchange and collaboration.

7. International Research Network – a parameter with a weight of 5% that evaluates the number of joint publications with international partners. It considers the number of publications in globally recognized scientometric databases, the number of partner countries, and the citation rate of joint publications. It is calculated using the formula

$$K_t^7 = \frac{\sum_{k=1}^S CA_k \cdot WC_k}{SA_t} \times 10, \quad (7)$$

where

K_t^7 – international research network indicator for the t-th period (%);

CA_k – number of joint articles with the international k-th partner for the t-th period, $k = \overline{1, s}$;

WC_k – weighting coefficient for the k-th partner, which may depend on the quality, quantity, or other characteristics of the partner;

SA_t – total number of research articles published by HEI faculty and researchers for the given t-th period.

8. Employment Outcomes – this parameter accounts for 5% and evaluates the impact of graduates on the labor market and their employability. It includes the graduate employment index and the influence of graduates across various industries. It is calculated using the formula

$$K_t^8 = v_1 \times \frac{E_t}{G_t} + v_2 \times \frac{I_t}{B_t}, \quad (8)$$

where

K_t^8 – overall employment outcomes indicator for the t-th period (%);

E_t – number of graduates who found employment after university graduation for the t-th period;

G_t – total number of graduates who completed their studies for the t-th period;

I_t – graduate impact index across various industries for the t-th period;

B_t – total number of industries where graduates have a significant impact;

v_1 i v_2 – weighting coefficients for each component, with the sum of the coefficients equal to 1 (or 100%).

9. Sustainability Indicator – this parameter has a weight of 5% and evaluates the contribution of the HEI to sustainable development and its achievements. It considers the environmental and social impact of the university, as well as the presence of equality and inclusion policies. The calculation formula includes social impact (45%), environmental impact (45%), and governance (10%), and is calculated using the formula

$$K_t^9 = f_1 \times EI_t + f_2 \times SI_t + f_3 \times PEI_t, \quad (9)$$

where

K_t^9 – overall sustainability indicator for the t-th period (%);

EI_t – environmental impact indicator of the HEI for the t-th period;

SI_t – social impact indicator of the HEI for the t-th period;

PEI_t – indicator of the presence of equality and inclusion policies for the t-th period;

f_1, f_2, f_3 – weighting coefficients for the components of environmental impact, social impact, and governance, respectively, with the sum of the coefficients equal to 1 (or 100%).

The model for forming university indicators according to the QS-WUR methodology is presented in Fig. 1.

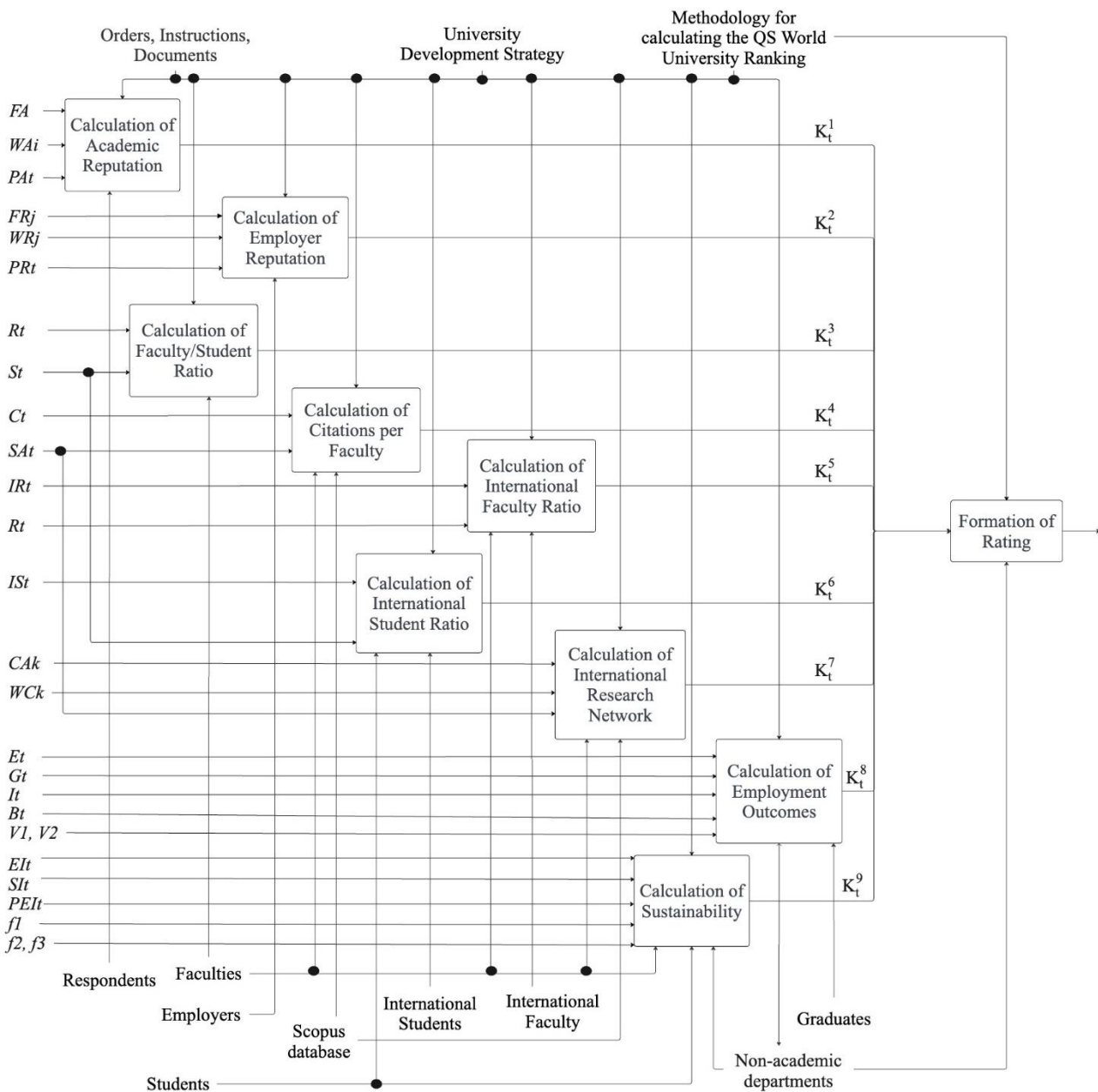


Fig. 1. Model for the Formation of QS-WUR Ranking Indicators

The object of this study is the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute." The main structural units of the university that are directly involved in organizing the educational process include educational and scientific institutes, departments, the postgraduate studies department, and the library. The status and functions of these units are defined by the University Statute [33] and corresponding regulations, while the formation of units is carried out based on the decision of the University Academic Council.

Educational and scientific institutes unite departments, laboratories, research centers, and other structural units that provide training at the bachelor's, master's, and educational-research levels. Departments conduct educational, methodological, and scientific activities in specific disciplines and are responsible for the training of academic and teaching staff. The postgraduate studies department oversees the preparation of PhD and Doctor of Science candidates, contributing to the advancement of scientific qualifications. The library provides information services to students and faculty, ensuring access to educational and scientific resources.

The management of the university is carried out by the rector, who is responsible for educational, scientific, and financial-economic activities. Supporting bodies include the Academic Council, which defines the development strategy and approves educational programs, and the Supervisory Board, which facilitates resource acquisition and oversees their utilization. Additionally, there are bodies of public self-governance, student self-governance, and scientific societies that ensure the participation of students and faculty in university management and the protection of their rights.

At the end of each year, the rector of NTU "KhPI" compiles and publicly publishes a report on the university's performance and achievements, which are measured by specific KPIs [34]. This information enables the assessment of the university's effectiveness, aligning with global educational trends and ranking requirements. Based on an analysis of the alignment between the university's KPIs and indicators defined in global rankings, adjustments to the KPI system of NTU "KhPI" have been proposed.

The KPI performance indicators of NTU "KhPI" include the results of educational, scientific, scientific-technical, and innovation activities, as well as financial-economic activities. The rector is responsible for implementing and maintaining modern educational programs and curricula approved by the Academic Council, ensuring the quality of the educational process and scientific research. The rector also oversees the performance efficiency of educational and scientific institutes, departments, postgraduate studies, and the library, particularly their contributions to training professionals and academic staff. Financial-economic KPIs under the rector's supervision include cost optimization, securing additional financial resources, and maintaining and efficiently utilizing university property. High efficiency indicators contribute to enhancing the university's competitiveness at both the national and international levels. Each year, the rector publishes key

performance indicators of the university on the official NTU "KhPI" website [34]. The formation of the rector's target KPI values is based on the performance indicators of institutes, departments, and other units, ensuring a comprehensive approach to evaluating the university's and its structural units' performance.

The KPI indicators of institutes and departments at NTU "KhPI" are interdependent. The KPI indicators of institutes are calculated as the sum of the KPI indicators of their respective departments, allowing for a two-level evaluation system instead of a three-level one. The main KPIs include educational and research performance, the number and quality of trained professionals, the volume and quality of scientific research, the successful implementation of educational programs, and other factors. Financial indicators such as resource utilization efficiency and additional financial inflows are also considered. This approach ensures a more holistic and coordinated management of educational and research processes within the university, contributing to the achievement of NTU "KhPI"'s overall strategic goals.

The objective of university management is to achieve the target KPI values at the end of the planning period for specific functions of all structural units. As basic criteria for each structural unit, it is proposed to use the deviation level of current KPIs from the target values at the end of the planning period. The criteria for structural units will be considered for different management levels of the hierarchical HEI system.

Let us take a closer look at the calculations of these indicators.

The change in the share of classroom hours taught in foreign languages ΔR_1 (%), is calculated using the formula

$$\Delta R_1 = \frac{R_t^1 - R_{t-1}^1}{R_{t-1}^1}, \quad (10)$$

where

ΔR_1 – change in the share of classroom hours taught in foreign languages (in percentage);

R_t^1 – new share of classroom hours taught in foreign languages (as a percentage of the total number of hours) for the current year;

R_{t-1}^1 – initial share of classroom hours taught in foreign languages (as a percentage of the total number of hours) in the previous calendar year.

The change in the number of higher education students participating in international academic mobility programs (lasting at least 1 month, per calendar year) ΔR_2 (%), is calculated using the formula

$$\Delta R_2 = \frac{R_t^2 - R_{t-1}^2}{R_{t-1}^2} \times 100\%, \quad (11)$$

where

ΔR_2 – change in the number of higher education students participating in international academic mobility programs (in percentage);

R_t^2 – number of students who participated in international academic mobility programs in the current calendar year;

R_{t-1}^2 – number of students who participated in international academic mobility programs in the previous calendar year.

The change in the number of full-time academic and research staff participating in international academic mobility programs (lasting at least 1 month, per calendar year) ΔR_3 (%), is calculated using the formula

$$\Delta R_3 = \frac{R_t^3 - R_{t-1}^3}{R_{t-1}^3} \times 100\%, \quad (12)$$

where

ΔR_3 – change in the number of full-time academic and research staff participating in international academic mobility programs (in percentage);

R_t^3 – number of staff members who participated in international academic mobility programs in the current calendar year;

R_{t-1}^3 – number of staff members who participated in international academic mobility programs in the previous calendar year.

The change in the number of classrooms equipped with multimedia equipment or other specialized equipment that ensures multimedia functionality (%) is calculated using the formula

$$\Delta R_4 = \frac{R_t^4 - R_{t-1}^4}{R_{t-1}^4} \times 100\%, \quad (13)$$

where

ΔR_4 – change in the number of classrooms equipped with multimedia equipment (in percentage);

R_t^4 – number of classrooms equipped with multimedia equipment in the current calendar year;

R_{t-1}^4 – number of classrooms equipped with multimedia equipment in the previous calendar year.

The change in the number of foreigners and stateless persons among higher education students of the HEI, including citizens of OECD member countries ΔR_5 , is calculated using the formula

$$\Delta R_5 = \frac{R_t^5 - R_{t-1}^5}{R_{t-1}^5} \times 100\%, \quad (14)$$

where

ΔR_5 – change in the number of foreigners and stateless persons among higher education students (in percentage);

R_t^5 – number of foreigners and stateless persons among higher education students in the current calendar year;

R_{t-1}^5 – number of foreigners and stateless persons among higher education students in the previous calendar year.

The change in the number of higher education students who submitted StartUp projects (%) (ΔR_6), is calculated using the formula

$$\Delta R_6 = \frac{R_t^6 - R_{t-1}^6}{R_{t-1}^6} \times 100\%, \quad (15)$$

where

ΔR_6 – change in the number of higher education students who submitted StartUp projects (in percentage);

R_t^6 – number of higher education students who submitted StartUp projects in the current calendar year;

R_{t-1}^6 – number of higher education students who submitted StartUp projects in the previous calendar year.

Implementation of comprehensive automation of higher education institution management, including an electronic document management system R_t^7 . Yes/No

Implementation of a key performance indicator system in the contracts of deputy heads of the HEI and heads of structural units R_t^8 . Yes/No.

Annual improvement of all subsystems of the corporate university management information system, including the current set of personal learning systems within the Learning Management System (LMS). This indicator R_t^9 is determined in the current calendar year based on availability (Yes/No).

The change in the number of indexed publications by academic and research staff in journals referenced in the Web of Science and Scopus scientometric databases, ΔR_{10} , is calculated using the formula

$$\Delta R_{10} = \frac{R_t^{10} - R_{t-1}^{10}}{R_{t-1}^{10}} \times 100\%, \quad (16)$$

where

ΔR_{10} – change in the number of indexed publications by academic and research staff (in percentage);

R_t^{10} – number of indexed publications by academic and research staff in the current calendar year;

R_{t-1}^{10} – number of indexed publications by academic and research staff in the previous calendar year.

Comparison with international KPIs will help identify opportunities for improvement and adaptation of best practices in the context of NTU "KhPI" activities. Analyzing these data for the university allows for determining which approaches to performance evaluation may be most relevant for the further development of the university, as well as which practices from other institutions can be implemented to enhance its global competitiveness.

To improve managerial activities, it is necessary to consider the indicators of the proposed QS-WUR ranking indicator formation model when determining the performance indicators of the university leader.

Results. Based on the conducted research on the performance indicators of NTU "KhPI" in accordance with the QS-WUR methodology, an approach to formalizing QS-WUR indicators that determine NTU "KhPI"'s position in this ranking has been proposed. A model for forming QS-WUR ranking indicators for NTU "KhPI" has been developed, providing an understanding of the information sources and the processes involved in determining each indicator's value. The model reflects the interaction of QS-WUR indicators used to create the university's ranking position.

The performance indicators of NTU "KhPI" management have been formalized and are published annually on the university's official website. They are calculated based on the system of activity indicators of NTU "KhPI" institutes and departments, ensuring a comprehensive approach to evaluating the university's performance and helping to understand how successfully

the institution fulfills its mission and achieves strategic goals. These indicators help identify strengths and weaknesses in management and the organization of the educational process.

Conclusion. The proposed KPI system for NTU "KhPI" will be used to determine effective resource allocation strategies and implement it as an innovative approach to managing educational, research, and international activities, ensuring high-quality standards and international recognition of the university.

Further research is focused on developing a tool for the optimal allocation of NTU "KhPI" resources, which will be used to improve the internal environment and enhance the university's external position in the QS-WUR global ranking. The application of this tool will contribute not only to achieving planned KPIs but also to increasing the institution's international competitiveness, creating a foundation for its sustainable development. Additionally, further research aims at developing an information system that will provide recommendations to NTU "KhPI" management regarding university resource allocation based on the KPI system. This will improve university efficiency by enhancing performance, increasing staff motivation, ensuring the rational use of resources, and strengthening the university's competitiveness in the global arena.

References

- Hazelkorn, E. (2015). *Rankings and the Reshaping of Higher Education: The Battle for World-Class Excellence*. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/9780230306394>
- QS Quacquarelli Symonds. (n.d.). *QS World University Rankings*. Available at: <https://support.qs.com/hc/en-gb/articles/4405955370898-QS-World-University-Rankings>. (accessed 18.01.2025)
- Times Higher Education. (2025). *World University Rankings 2025 Methodology*. Available at: <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/world-university-rankings-2025-methodology>. (accessed 18.01.2025)
- Muñoz-Suárez, M., Guadalajara, N., & Osca, J. M. (2020). A Comparative Analysis between Global University Rankings and Environmental Sustainability of Universities. *Sustainability*, 12(14), 5759. <https://doi.org/10.3390/su12145759>
- Natt, A. (2018). *The methodology used for the Times Higher Education World University Rankings' citations metric can distort benchmarking*. University of Bedfordshire Repository. Available at: <https://uobrep.openrepository.com/handle/10547/622340>. (accessed 03.08.2024)
- Baccini, A., Banfi, A., De Nicolao, G., & Galimberti, P. (2015). University ranking methodologies: An interview with Ben Sowter about the Quacquarelli Symonds World University Ranking. *RT. A Journal on Research Policy and Evaluation*, 3(1). <https://doi.org/10.13130/2282-5398/6446>
- Estrada-Real, A. C., & Cantu-Ortiz, F. J. (2022). A data analytics approach for university competitiveness: The QS world university rankings. *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 16, 871–891. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00966-2>
- ShanghaiRanking Consultancy. (2024). *Academic Ranking of World Universities 2024*. Available at: <https://www.shanghairanking.com/rankings/arwu/2024>. (accessed 18.01.2025)
- Vidal, P., & Filliatreau, G. (2014). Graphical Comparison of World University Rankings. *Higher Education Evaluation and Development*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.6197/HEED.2014.0801.01>
- Boshoff, N. (2009). Shanghai Academic Ranking of World Universities (ARWU) and the 'big five' South African research universities. *South African Journal of Higher Education*, 23(4), 635–655. <https://doi.org/10.4314/sajhe.v23i4.51056>
- Leiden University. (n.d.). *CWTS Leiden Ranking*. Available at: <https://www.leidenranking.com>. (accessed 18.01.2025)
- Nees Jan van Eck, & Waltman, L. (2018). Analyzing the activities of visitors of the Leiden Ranking website. *Journal of Data and Information Science*, 3(2). <https://doi.org/10.2478/JDIS-2018-0015>
- Orsolin, A., Bortoluzzi, A., Ávila, L., Souza, A., & Selli, L. (2023). Analysis of the performance of the best participating universities in the World University ranking - Times Higher Education (THE). *Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior (Campinas)*, 28. <https://doi.org/10.1590/s1414-40772023000100027>
- Ji, C. Y. (2023). The development of world's best universities - Visual analysis of TIMES university rankings based on Tableau. *The 2023 2nd International Conference on Education, Philosophy, and Social Sciences*, 8(1). <https://doi.org/10.56028/aehtsr.8.1.410.2023>
- Shaulska, L., Laktionova, O., Nagorniyak, T., & Sereda, H. (2021). Performance management at Ukrainian university: A case of the KPIs use. *Problems and Perspectives in Management*, 19(1), 78–89. [https://doi.org/10.21511/ppm.19\(1\).2021.07](https://doi.org/10.21511/ppm.19(1).2021.07)
- Harvard Office of Technology Development. (n.d.). *Productivity highlights*. Available at: <https://otd.harvard.edu/impact/productivity-highlights>. (accessed 18.01.2025)
- Sutanto, S., Christy, A. Y., & Sandi, D. K. (2021). Creative University: A Definition and Activities Management Based on the Completion of Key Performance Indicator (KPI). *Journal of Technology Management & Innovation*, 16(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-27242021000300013>
- Omarbekova, A. S., Saukhanova, Z. S., Zakirova, A. B., Abduraimova, B. K., & Saukhanova, M. S. (2019). KPI Estimation for the University Faculty. *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, 36, 333–336. <https://doi.org/10.1145/3330431.3330468>
- Kurniadi, R., Arpizal, A., Fajarsari, A. D., Yaldi, D., & Mayasari, M. (2023). Strategy for Optimizing the Achievements of IKU 5 Universitas Jambi. *Anterior Jurnal*, 22(1), 106–110. <https://doi.org/10.33084/anterior.v22i1.4100>
- Komarudin, M., Suharno, Mardiana, D., Despa, H. D., Septama, H. D., & Yulianti, T. (2023). 'Design of Key Performance Indicator Dashboard for Indonesian Higher Education based on One Data', *Proceedings of the 2023 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, pp. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCTEIE60099.2023.10366722>.
- Gordon, L. C., Gratz, E., Kung, D. S., Dyck, H., & Lin, F. (2017). Strategic Analysis of the Role of Information Technology in Higher Education – A KPI-centric model. *Communications of the IIMA*, 15(1), Article 2. <https://doi.org/10.58729/1941-6687.1367>
- Varouchas, E., Sicilia, M.-Á., & Sánchez-Alonso, S. (2018). Academics' Perceptions on Quality in Higher Education Shaping Key Performance Indicators. *Sustainability*, 10(12), 4752. <https://doi.org/10.3390/su10124752>
- Septama, H. D., Komarudin, M., Wintoro, P. B., Pratama, M., Yulianti, T., Sulistiono, W. E. Implementation of One Data-based Lecturer Profile Information System for Key Performance Indicator Monitoring. *Proceedings of the 2022 Seventh International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, 2022, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIC56845.2022.10006928>.
- Karimova, V. Automation of KPI Calculation for Leadership Personnel of Higher Educational Institutions. *Proceedings of the 6th International Conference on Information Systems and Computing Technologies (ICISCT)*, 2021, pp. 212–220. DOI: <https://doi.org/10.1109/icisct52966.2021.9670079>.
- Chang, Z. (2019). Exploration on the Performance Evaluation Reform of Private University Teachers Based on the "KPI Plus Competency" Dual-Track System. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 124–130. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.191225.116>
- Ahmed, A. E.-A., Badawy, M., & Hefny, H. A. (2017). Exploring and Measuring the Key Performance Indicators in Higher Education Institutions. *ResearchGate*, 18(1), 32–48. Available at: https://www.researchgate.net/publication/321781292_Exploring_and_Measuring_the_Key_Performance_Indicators_in_Higher_Education_institutions. (accessed 18.01.2025)

27. Peral, J., Maté, A., & Marco, M. (2016). Application of Data Mining Techniques to Identify Relevant Key Performance Indicators. *Computer Standards & Interfaces*, 50, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2016.09.009>
28. Lo-Iacono-Ferreira, V. G., Capuz-Rizo, S. F., & Torregrosa-López, J. I. (2017). Key Performance Indicators to Optimize the Environmental Performance of Higher Education Institutions with Environmental Management System – A Case Study of Universitat Politècnica de València. *Journal of Cleaner Production*, 178, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.184>
29. Lytras, M. D., Aljohani, N. R., Visvizi, A., De Pablos, P. O., & Gasevic, D. (2018). Advanced Decision-Making in Higher Education: Learning Analytics Research and Key Performance Indicators. *Behaviour & Information Technology*, 37(10), 987–1002. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2018.1512940>
30. Hrinchenko, M. A., Moskalenko, V. Yu. (2024). Kohnetyvne modeliuвання dlia stratehichnoho analizu konkurentnoho statusu IT-kompanii [Cognitive modeling for strategic analysis of the competitive status of an IT company]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnia, upravlinnia portfeliami, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program, and Project Management], 1(8), pp. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2024.8.3>.
31. Shaposhnikov, M. I., Hrinchenko, M. A., & Hrinchenko, Ye. M. (2024). Informatsiina tekhnolohiia rozpodilu resursiv universytetu z metoiu pokrashchennia yoho reitynhovykh pozytsii [Information technology for university resource allocation to improve its ranking positions]. *Informatyka, informatsiini systemy ta tekhnolohii: tezy dopovidei dvadtsiat pershoi vseukrainskoi konferentsii studentiv i molodykh naukotsiv, Odesa, 26 kvitnia 2024 r.* [Informatics, Information Systems, and Technologies: Abstracts of the 21st All-Ukrainian Conference of Students and Young Scientists, Odesa, 26 April 2024], pp. 104-106. Available at: http://dspace.pdpu.edu.ua/bitstream/123456789/19142/1/2024%20Zbirka_tez_IIS%26T-2024.pdf (Accessed: 18 January 2025).
32. QS World University Rankings 2024: найкращі світові університети. Available at: <https://www.topuniversities.com/world-university-rankings/2024>. (accessed 18.01.2025)
33. (n.d.). Statute. Available at: <https://public.kpi.kharkov.ua/administrativna-diyalnist/statut/>. (accessed 18.01.2025)
34. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". (n.d.). Report of the Rector. Available at: <https://public.kpi.kharkov.ua/administrativna-diyalnist/zvit-rektora/>. (accessed 18.01.2025)

Received (надійшла) 10.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Гринченко Марина Анатоліївна (Grinchenko Marina) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувачка кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Харків, Україна; e-mail: marinagrunchenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8383-2675>

Шапошніков Микита Ігорович (Shaposhnikov Mykyta) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, Харків, Україна; e-mail: nikshaposhnikov01@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8737-2083>

V. I. ZIUZIUN

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОНЯТТЯ ПОХІДНИХ РИЗИКІВ ВІД РОЗВИТКУ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ В АСПЕКТІ ДІЯЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ГОСПОДАРЮВАННЯ ТА ЇХ СТРАТЕГІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ

У сучасних умовах функціонування підприємств зовнішнє середовище є визначальним фактором у формуванні їхньої стратегії та тактики розвитку. Динамічні зміни ринкових, економічних, політичних, соціальних та технологічних параметрів обумовлюють необхідність розробки системного підходу до аналізу впливу зовнішніх факторів на внутрішні бізнес-процеси. Одним із ключових аспектів такого аналізу є оцінка похідного ризику від розвитку впливу, який може бути формалізований у вигляді функціональної залежності між зовнішніми впливами, бізнес-процесами підприємства та їхніми результатами. Метою роботи є розробка та обґрунтування математичної моделі дослідження розвитку зовнішніх впливів на діяльність об'єктів господарювання, яка дозволяє систематизувати процес оцінки та управління ризиками шляхом використання кількісних методів аналізу. У рамках дослідження формалізовано основні компоненти моделі: множину зовнішніх впливів, бізнес-процеси підприємства, похідні ризики та кінцевий стан об'єкта впливу. Запропонована модель враховує ключові фактори зовнішнього середовища (економічні, політичні, соціальні, екологічні та технологічні чинники) та їхній вплив на основні бізнес-функції: операційну діяльність, фінансове управління, маркетинг, постачання та управління персоналом. Особлива увага приділена механізму формування похідних ризиків, який виражається через систему рівнянь, що описують залежності між зовнішніми впливами та динамікою змін бізнес-процесів підприємства. На основі математичного опису, включаючи лінійні та нелінійні залежності, ймовірнісний аналіз і методи оптимізації, розроблена система кількісної та якісної оцінки ризиків. Це дозволяє ефективно прогнозувати розвиток ризиків та формувати оптимальні стратегії реагування. Використання ймовірнісного підходу допомагає моделювати можливі сценарії розвитку ситуацій та обирати найкращі варіанти рішень. Практичне значення моделі полягає у її застосуванні для: стратегічного планування шляхом визначення потенційних загроз і можливостей; управління ризиками на основі кількісного аналізу їхнього впливу на бізнес-процеси; оптимізації ресурсів підприємства з метою мінімізації потенційних втрат; адаптації підприємства до динамічних змін зовнішнього середовища; підвищення операційної ефективності завдяки гнучкості бізнес-процесів та проактивним стратегіям реагування. Таким чином, результати дослідження можуть бути використані як ефективний інструмент для підвищення стійкості підприємства, оптимізації його функціонування та розробки антикризових заходів у відповідь на зовнішні виклики.

Ключові слова: стратегічне управління, управління об'єктом господарювання, зовнішній вплив, ризики, похідний ризик, похідний ризик від розвитку впливу, моделювання, об'єкт господарювання.

V. ZIUZIUN

EXPLORING THE CONCEPT OF DERIVATIVE RISKS ARISING FROM EXTERNAL INFLUENCES IN THE CONTEXT OF BUSINESS OPERATIONS AND THEIR STRATEGIC STABILITY

In the modern operational environment, external factors play a decisive role in shaping the strategy and tactics of enterprise development. The dynamic changes in market, economic, political, social, and technological parameters necessitate the development of a systematic approach to analyzing the impact of external factors on internal business processes. One of the key aspects of such analysis is the assessment of derivative risk from influence development, which can be formalized as a functional dependence between external influences, business processes, and their outcomes. The objective of this study is to develop and substantiate a mathematical model for analyzing the development of external influences on the activities of business entities. This model aims to systematize the process of risk assessment and management through the use of quantitative analytical methods. The study formalizes the key components of the model, including the set of external influences, business processes, derivative risks, and the final state of the affected entity. The proposed model takes into account key external environmental factors – economic, political, social, environmental, and technological – and their impact on core business functions, such as operations, financial management, marketing, supply chain management, and human resources. Particular attention is paid to the mechanism of derivative risk formation, which is expressed through a system of equations that describe the dependencies between external influences and the dynamics of changes in business processes. Based on the mathematical framework, which includes linear and nonlinear dependencies, probabilistic analysis, and optimization methods, a system for quantitative and qualitative risk assessment has been developed. This approach enables effective risk forecasting and the formulation of optimal response strategies. The probabilistic approach facilitates the modeling of potential scenarios and the selection of the best decision-making options. The practical significance of the model lies in its application for strategic planning by identifying potential threats and opportunities, risk management based on quantitative analysis of their impact on business processes, resource optimization to minimize potential losses, enterprise adaptation to dynamic external changes, and enhancing operational efficiency through flexible business processes and proactive response strategies. Thus, the results of this study can be utilized as an effective tool for enhancing enterprise resilience, optimizing operations, and developing crisis management measures in response to external challenges.

Keywords: strategic management, business entity management, external influence, risks, derivative risk, derivative risk from influence development, modeling, business entity.

Вступ. У сучасних умовах динамічного розвитку зовнішнього середовища підприємства постійно стикаються з різноманітними факторами, які можуть як сприяти їхньому розвитку, так і створювати загрози для їхньої діяльності. Взаємодія між зовнішніми впливами та внутрішніми бізнес-процесами є складним та багатограним процесом, що вимагає системного підходу до аналізу та управління ризиками. Зовнішні фактори, такі як економічна нестабільність, законодавчі зміни, технологічний

прогрес, соціальні тенденції та екологічні виклики, можуть мати як позитивні, так і негативні наслідки для функціонування об'єкта господарювання.

Існує досить багато теорій з управління ризиками, а також відповідних класифікацій та категоризацій ризиків. Серед них важливе місце посідають зовнішні ризики, проте зазвичай вони розглядаються як вже конкретні процеси, які безпосередньо впливають на діяльність об'єкта. Водночас вплив зовнішніх факторів на діяльність

підприємства часто має нелінійний характер, що ускладнює прогнозування та управління цими впливами.

Методологія системної динаміки, розроблена Дж. Форрестером у 1950-х роках, дозволяє моделювати складні системи з урахуванням нелінійних взаємозв'язків та зворотних зв'язків. У своїй книзі «Індустріальна динаміка» (1961) Форрестер представив підхід до аналізу промислових підприємств як динамічних систем, що взаємодіють із зовнішнім середовищем. Застосування системної динаміки дозволяє враховувати складні взаємозв'язки між різними елементами системи, включаючи зовнішні фактори, що впливають на підприємство. Це особливо важливо в умовах нестабільного ринкового середовища, де лінійні моделі можуть бути недостатніми для адекватного відображення реальних процесів [1].

Проте дуже часто зовнішні фактори, які ми будемо називати «зовнішні впливи», можуть мати наслідки не лише для окремих процесів, але й для групи процесів, спричиняючи різні типи наслідків. Такі впливи можуть нести економічні, соціальні, юридичні та екологічні наслідки для об'єкта, і тому їх не можна розглядати просто як «зовнішній ризик». Це більш широке поняття, яке вимагає глибокого дослідження та аналізу.

Враховуючи складність та багатогранність наслідків від зовнішніх впливів, доцільно вводити нове поняття – «похідний ризик від впливу». Це поняття передбачає комплексний підхід до оцінки наслідків зовнішніх впливів, які можуть впливати на різні аспекти діяльності підприємства одночасно. Похідний ризик від впливу включає в себе взаємозв'язки між різними видами ризиків та їхню взаємодію, що дозволяє розробляти більш ефективні механізми реагування та управління такими ризиками.

Введення поняття «похідного ризику від впливу» дозволяє:

- оцінювати вплив зовнішніх факторів не лише в короткостроковій перспективі, а й з точки зору довгострокових наслідків.
- розглядати зовнішні впливи в контексті їхньої взаємодії з внутрішніми процесами підприємства.
- розробляти комплексні стратегії управління ризиками, які враховують потенційні взаємозв'язки між різними аспектами діяльності підприємства.
- використовувати методи системного аналізу та системної динаміки для прогнозування розвитку ситуацій та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Таким чином, використання концепції «похідного ризику від впливу» може стати важливим інструментом в управлінні підприємством, дозволяючи підвищити стійкість до зовнішніх викликів та забезпечити ефективне функціонування в умовах мінливого середовища.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. В праці [2] досліджується зростання значущості зовнішніх факторів впливу на систему сучасного

промислового підприємства вимагає їх ретельного врахування у процесі управління. Зазначається, що для ефективного вирішення стратегічних завдань необхідно своєчасно оцінювати вплив цих факторів на продуктивність праці та ефективність управління підприємством.

В дослідженні [3] зазначається, що ефективна система внутрішнього контролю є ключовим інструментом для ідентифікації та управління ризиками, що впливають на діяльність підприємства. Її впровадження дозволяє підвищити достовірність звітності та забезпечити стійкість підприємства в умовах невизначеності.

В праці [4] авторами досліджено особливості застосування методології DevOps у корпоративних IT-інфраструктурах провідних фірм України, визначено основні ризики та виклики її впровадження, а також запропоновано системний підхід до їх мінімізації. Встановлено, що успішне впровадження DevOps потребує створення крос-функціональних команд та забезпечення високого рівня автоматизації, особливо у сфері безпеки. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації DevOps-процесів та перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

У статті [5] досліджено ефективність застосування методів імітаційного моделювання для прийняття управлінських рішень у проектному менеджменті IT, що дозволяє керівникам оптимізувати ресурси, мінімізувати ризики та приймати обґрунтовані рішення в умовах невизначеності. Наведено практичні приклади використання імітаційного моделювання для бізнес-ситуацій, а також рекомендації щодо його впровадження у практику IT-організацій.

У роботі [6] досліджено інтеграцію методології Lean Six Sigma в Scaled Agile Framework (SAFe) для підвищення ефективності управління ризиками в IT-проектах з гнучкими методологіями, що дозволяє краще ідентифікувати, аналізувати та контролювати ризики. Наголошується, що такий підхід сприяє мінімізації втрат, підвищенню якості продукції та задоволенню вимог замовників в умовах швидких змін IT-середовища.

У статті [7] аналізуються заходи з управління ризиками відповідно до різних стандартів ISO з метою покращення координації та взаємодії в управлінні IT, IT-послугами, якістю, проектами та інформаційною безпекою. Визначено, що для ефективності управлінської системи важливо використовувати цикл PDCA, що сприяє плануванню, впровадженню та покращенню процесів, а також запобіганню негативним наслідкам.

У статті [8] запропоновано новий підхід до застосування фінансової інженерії з точки зору управління валютними ризиками, який поєднує різноманітні інформаційні технології. Дослідження показало, що цей підхід підвищує ефективність управління валютними ризиками та знижує рівень таких ризиків за рахунок посилення інформаційного управління, покращення рівня інновацій та створення науково-технологічної системи.

Цифрова трансформація підприємств стала неминучою, оскільки вона відкриває нові можливості та виклики, а також підвищує рівень ризиків. У статті [9] розглядаються етапи цифрової трансформації традиційних підприємств з двох аспектів: розбудови програмно-апаратної інфраструктури та інформатизації бізнес-процесів, а також пропонується модель управління ризиками. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту дозволило досягти 88,7% точності у попередженні та ідентифікації ризиків і 79% у їх оцінці та вимірюванні, що значно підвищує стійкість підприємств до ризиків.

У дослідженні [10] проведено аналіз взаємозв'язку антикризового управління, управління економічною безпекою та ризик-менеджменту, виявлено їхню значну тотожність і спільні риси. Визначено, що ризик-менеджмент є ключовим інструментом реалізації систем антикризового управління та управління економічною безпекою підприємства, сприяючи їх ефективності та стійкості.

Автори дослідження [11] обґрунтовують, що управління ризиками як окремих процесів не існує, а замість цього слід використовувати концепцію управління втратами від ризиків, яка включає ризик-менеджмент і ризик-виробництво. Отримані результати можуть сприяти усуненню зайвих витрат на неефективні процеси та підвищенню ефективності управління втратами в умовах ризику.

Основна частина дослідження. Для початку варто розглянути поняття «похідного ризику від розвитку впливу». Даний термін пропонується як ключовий в розвитку моделі яка буде запропонована нижче.

Отже, похідний ризик від розвитку впливу (визначення запропоноване автором) – це певна подія позитивного або негативного (загроза або небезпека) характеру, яка проявляється і відповідно має причинно-наслідкову дію на бізнес-процеси діяльності певного об'єкта господарської діяльності лише у випадку настання зовнішнього впливу, який розглядається.

Іншими словами, це ризик, який з'являється не сам по собі, а як реакція на певні зміни у зовнішньому середовищі, наприклад, зміни в законодавстві, нові технології або економічні кризи.

Варто виділити головні риси похідного ризику від розвитку впливу (зовнішнього):

- виникає тільки після зовнішнього впливу (ризик проявиться лише тоді, коли відбудеться конкретна подія (наприклад, підвищення податків або зміна курсу валют));

- може бути як позитивним, так і негативним (негативний ефект: збільшення витрат, зниження продажів / позитивний ефект (нові можливості для розвитку, зростання прибутку));

- залежить від багатьох факторів (наприклад, політичні зміни, технологічні новинки, поведінка споживачів, зміни в ринку);

- впливає на різні частини бізнесу (може змінити виробництво, фінанси, постачання, продажі та інші сфери діяльності компанії).

Розглянемо декілька прикладів похідних ризиків від розвитку впливу для наочного розуміння даного поняття.

Якщо уряд змінює закони про екологію, підприємство може зазнати витрат на модернізацію обладнання (негативний ризик) або отримати нові ринки збуту завдяки екологічній продукції (позитивний ризик). Іншим прикладом може слугувати впровадження нових технологій. Це може знизити витрати на виробництво або призвести до необхідності навчати персонал.

Також, як приклад похідного ризику від зовнішнього впливу на діяльність ІТ об'єкта господарювання можна розглянути Закон України № 4303 «Про стимулювання розвитку цифрової економіки в Україні», який передбачає створення спеціального правового режиму для ІТ-галузі – Дія City.

Позитивні наслідки для ІТ-компанії від імплементації положень Закону у свою діяльність:

- фіскальні стимули та податкові пільги, що дозволяють знизити витрати на оподаткування та стимулюють інвестиції у розвиток компанії;

- легалізація відносин з ІТ-фахівцями, що сприяє зменшенню тіньової економіки та спрощенню юридичних процедур;

- залучення іноземних інвестицій, оскільки створюються сприятливі умови для розвитку технологічних стартапів та масштабування бізнесу;

- спрощена взаємодія з державними органами, що знижує бюрократичне навантаження та підвищує прозорість бізнес-процесів.

Переваги досить суттєві, але не менш суттєве значення мають негативні моменти, які можуть проявитися у випадку неврахування всіх похідних ризиків (загроз від невиконання вимог). А саме – це:

- збільшення залежності від державного регулювання, що може призвести до обмежень у веденні бізнесу та втрати гнучкості у управлінні;

- ризик посилення податкового тиску в майбутньому, якщо законодавство зазнає змін у несприятливому напрямку;

- конкуренція за кадри, оскільки зростаючий попит на ІТ-фахівців може призвести до підвищення зарплат і зростання витрат компанії;

- обмеження для невеликих компаній, які можуть не відповідати встановленим критеріям для участі в ДіяСіті, що створює нерівні умови на ринку.

Враховуючи вищезазначене, стає очевидним, що зовнішні впливи є ключовими факторами, які визначають умови функціонування та розвитку підприємств у сучасному динамічному середовищі. Реакція бізнес-процесів на ці впливи може бути як позитивною, так і негативною, що вимагає розробки системного підходу до аналізу та оцінки ризиків.

Для ефективного управління та адаптації до змін необхідно застосовувати комплексні методи дослідження, які дозволяють не лише ідентифікувати

зовнішні чинники впливу, але й оцінити їхній потенційний розвиток і вплив на бізнес-процеси об'єкта господарювання.

Саме з цією метою розроблено первинну спрощену модель дослідження розвитку зовнішнього

впливу, яка є інструментом для структурованого аналізу, прогнозування можливих похідних ризиків та оцінки наслідків зовнішніх впливів на діяльність підприємств (рис. 1).

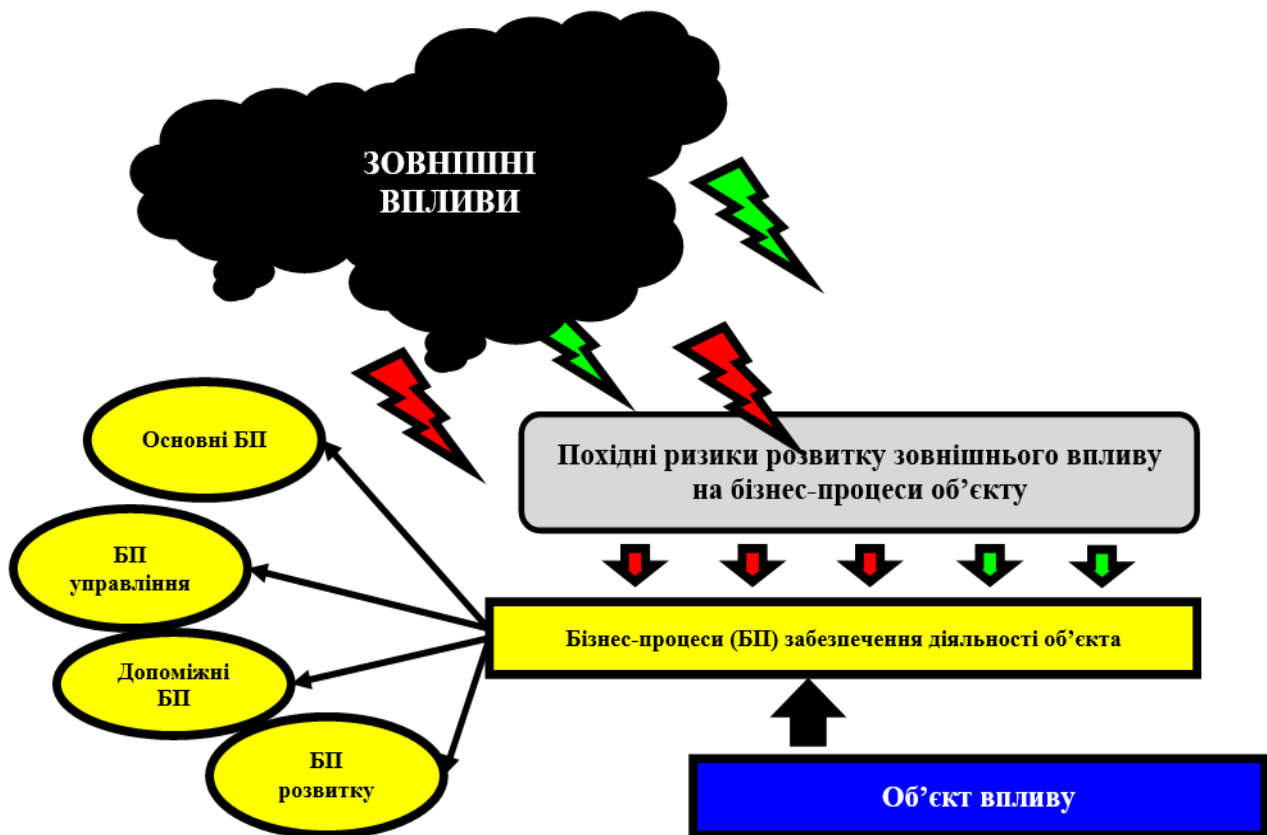


Рис. 1. Первинна модель дослідження розвитку зовнішнього впливу на діяльність об'єкта

Запропонована модель дозволяє:

- виявляти та класифікувати зовнішні фактори впливу;
- оцінювати ризики та можливості, що виникають унаслідок змін у зовнішньому середовищі;
- формувати стратегії реагування на загрози та використання можливостей;
- забезпечувати гнучкість та адаптивність бізнес-процесів.

Розглянемо структуру розробленої моделі (рис. 1), її ключові елементи, взаємозв'язки між ними та методологічні основи, що дозволяють ефективно застосовувати модель для практичних потреб підприємств.

Загальна концепція моделі.

Запропонована модель ілюструє взаємозв'язок між зовнішніми впливами та бізнес-процесами об'єкта господарської діяльності через механізм похідного ризику. Модель враховує можливість як негативного (загроза або небезпека), так і позитивного впливу на систему.

Ключові елементи моделі.

Зовнішні впливи (чорна хмара).

Представляють будь-які зовнішні фактори, що можуть мати вплив на діяльність підприємства. До

них можуть належати економічні, політичні, соціальні, екологічні та технологічні чинники.

Похідні ризики розвитку зовнішнього впливу (сірий прямокутник із чорним текстом). Вони виникають як наслідок зовнішніх впливів та можуть мати позитивний або негативний характер. Окрім того, вони впливають на бізнес-процеси об'єкта шляхом зміни їх ефективності, продуктивності або стійкості.

Бізнес-процеси забезпечення діяльності об'єкта (жовтий прямокутник). Аналізу підлягають наступні бізнес-процеси:

- основні бізнес-процеси (основні БП) – критично важливі процеси, які забезпечують основну діяльність підприємства.
- бізнес-процеси управління (БП управління) – процеси, які відповідають за координацію діяльності організації.
- допоміжні бізнес-процеси (допоміжні БП) – підтримують основні процеси, забезпечуючи їх ефективність.
- бізнес-процеси розвитку (БП розвитку) – пов'язані з інноваціями та стратегічним розвитком підприємства.

Об'єкт впливу (синій прямокутник). Кінцевий елемент системи, на який спрямовано впливи через

бізнес-процеси. Він може зазнати змін в результаті похідних ризиків.

Механізм впливу. Зовнішні впливи надходять у вигляді потенційних загроз або можливостей.

Через систему бізнес-процесів впливи можуть призводити до різних похідних ризиків (червоні стрілки – негативний вплив, зелені – позитивний).

Результатом взаємодії стає зміна стану об'єкту впливу, що проявляється у вигляді певних наслідків для його діяльності.

Призначення моделі.

Розроблена модель є ефективним інструментом для комплексного аналізу зовнішнього середовища та забезпечення стратегічної стабільності підприємства. Вона дозволяє:

- ідентифікувати потенційні загрози та можливості зовнішнього середовища, враховуючи економічні, політичні, соціальні, технологічні та екологічні чинники, що можуть впливати на діяльність підприємства;

- визначати критичні точки бізнес-процесів, які є найбільш чутливими до зовнішніх впливів, з метою своєчасного реагування та підвищення їхньої стійкості;

- прогнозувати розвиток ризиків та оцінювати можливі сценарії їх реалізації, що сприяє розробці ефективних антикризових стратегій;

- оптимізувати ресурси підприємства для мінімізації потенційних втрат та максимізації вигоди від можливих сприятливих зовнішніх умов;

- підвищувати адаптивність підприємства за рахунок швидкого реагування на зміни зовнішнього середовища та гнучкого управління бізнес-процесами;

- забезпечувати інформаційну підтримку управлінських рішень шляхом систематичного збору, аналізу та обробки даних про зовнішні впливи;

- розробляти проактивні стратегії для зниження рівня ризиків та використання нових можливостей, що забезпечує довгострокову конкурентоспроможність підприємства.

Таким чином, модель сприяє не лише захисту від негативних впливів, а й використанню нових перспектив для зростання та розвитку бізнесу.

Окремо варто розглянути практичне значення такої моделі. Запропонована первинна модель, та її подальший розвиток і удосконалення, може дозволити керівництву не лише реагувати на зовнішні загрози, а й проактивно розробляти стратегії для підвищення стійкості та ефективності операційної діяльності.

Модель може бути інтегрована у процес стратегічного планування управління. Це може бути виконано з метою:

- оцінки довгострокових ризиків (використання аналізу зовнішніх факторів для прогнозування можливих сценаріїв розвитку бізнесу);

- формування стратегії адаптації (розробка сценаріїв реагування на можливі зміни макросередовища, такі як економічні кризи, зміни законодавства чи технологічні прориви);

- оптимізації ресурсного забезпечення (ідентифікація критичних бізнес-процесів, які

потребують додаткового фінансування чи захисту від зовнішніх впливів та загроз);

- розробки антикризових стратегій (підготовка підприємства до потенційних загроз шляхом створення резервних планів реагування);

- забезпечення конкурентоспроможності (аналіз впливу ринкових факторів і формування заходів для підтримки ринкових позицій компанії);

- формування стратегії адаптації (розробка сценаріїв реагування на можливі зміни макросередовища, такі як економічні кризи, зміни законодавства чи технологічні прориви);

- оптимізації ресурсного забезпечення (ідентифікація критичних бізнес-процесів, які потребують додаткового фінансування чи захисту від зовнішніх ризиків);

- розробки антикризових стратегій (підготовка підприємства до потенційних загроз шляхом створення резервних планів реагування);

- забезпечення конкурентоспроможності (аналіз впливу ринкових факторів і формування заходів для підтримки ринкових позицій компанії).

Запропонована модель може бути інтегрована у системи управління ризиками підприємства (ERM – Enterprise Risk Management), що дозволить: ідентифікувати потенційні похідні ризики; оцінювати похідні ризики в кількісному та якісному вираженні: розробляти метрики і KPI для моніторингу ризиків у реальному часі; розробляти плани зниження ризиків; здійснювати інтеграцію з інформаційними системами (автоматизація процесу збору даних про зовнішні фактори та їхній вплив на внутрішні процеси підприємства); побудувати системи раннього попередження.

Використання моделі для аналізу зовнішніх впливів допомагає адаптувати HR-стратегію підприємства, зокрема:

- здійснювати оцінку впливу соціально-економічних змін на персонал (адаптація до змін у ринку праці);

- створювати плани навчання та розвитку (забезпечення готовності персоналу до можливих змін у бізнес-середовищі);

- впроваджувати мотиваційні заходи (формування політики винагороди з урахуванням зовнішніх ризиків);

- здійснювати управління трудовими ризиками (прогнозування потенційних загроз, пов'язаних із кадровими змінами).

Корпоративна безпека та відповідність нормативним вимогам. Даний аспект є одним із найбільш ключових аспектів для ІТ компаній в наш час, особливо з урахуванням вимог ДіяСіті.

Модель допомагатиме в управлінні ризиками, пов'язаними із правовими та регуляторними змінами:

- оцінка регуляторних ризиків (аналіз змін у законодавстві та їхнього впливу на бізнес-процеси);

- розробка політик відповідності (впровадження заходів для дотримання нормативних вимог);

- підготовка до аудиту та сертифікації (мінімізація ризику невідповідності стандартам);

- захист інформаційних активів (впровадження заходів щодо кібербезпеки та управління інформаційними ризиками).

Також, модель може бути ефективно застосована для передбачення кризових ситуацій та розробки заходів для їхнього запобігання або мінімізації наслідків, зокрема:

- розробки сценаріїв кризових ситуацій (визначення потенційних загроз для бізнесу);
- створення планів антикризового реагування (підготовка підприємства до можливих криз шляхом чіткого плану дій);

- відновлення після криз (визначення шляхів виходу з кризових ситуацій із мінімальними втратами).

- стратегічного резервування ресурсів (планування резервів для забезпечення безперерійної діяльності у випадку зовнішніх потрясінь).

Запропонована первинна модель може бути формалізована за допомогою математичних залежностей, які відображають взаємозв'язок між зовнішніми впливами, бізнес-процесами та кінцевим об'єктом впливу.

Вхідні параметри моделі

Позначимо основні компоненти моделі.

Множина зовнішніх впливів:

$$E(t) = \{e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)\}, \quad (1)$$

де, $E(t)$ – множина зовнішніх впливів у момент часу t ; e_n – (економічні, політичні, соціальні, екологічні та технологічні чинники).

Множину бізнес-процесів об'єкту діяльності представимо наступним чином:

$$P(t) = \{p_{осн}(t), p_{упр}(t), p_{доп}(t), p_{роз}(t)\}, \quad (2)$$

де, $p_{осн}(t)$ – основні бізнес-процеси; $p_{упр}(t)$ – бізнес-процеси управління; $p_{доп}(t)$ – допоміжні бізнес-процеси; $p_{роз}(t)$ – бізнес-процеси розвитку.

Множина похідних ризиків від зовнішніх впливів:

$$R(t) = \{r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)\}, \quad (3)$$

Похідні ризики від зовнішніх впливів, що можуть бути позитивними та негативними.

Кінцевий стан об'єкта впливу, залежний від ризиків представимо як параметр $O(t)$.

Формалізація взаємозв'язку між компонентами.

Вплив зовнішніх факторів на бізнес-процеси. Рівень впливу зовнішніх факторів на бізнес-процеси можна виразити через лінійну комбінацію факторів із коефіцієнтами вагомості:

$$P(t) = A \cdot E(t), \quad (4)$$

де, A – матриця впливу (розмірності $m \times n$), яка визначає, як кожен зовнішній фактор впливає на конкретний бізнес-процес, $E(t)$ – вектор (множина) зовнішніх впливів.

Для кожного процесу:

$$p_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} e_j(t). \quad (5)$$

Формування похідних ризиків. Похідні ризики залежать від стану бізнес-процесів та їхньої чутливості до зовнішніх впливів:

$$R(t) = B \cdot P(t), \quad (4)$$

де, B – матриця ризиків (розмірності $k \times m$), що враховує рівень чутливості бізнес-процесів до змін; $P(t)$ – вектор бізнес-процесів.

Для кожного ризику:

$$T_k(t) = \sum_{i=1}^m b_{ki} p_i(t). \quad (5)$$

Вплив похідних ризиків на об'єкт господарювання. Зміна стану об'єкта господарювання через реалізацію похідних ризиків:

$$O(t) = O_0 + \sum_{k=1}^k \gamma_k r_k(t), \quad (6)$$

де, O_0 – початковий стан об'єкта; γ_k – коефіцієнти впливу ризику на стан об'єкта.

Якщо враховувати можливі позитивні та негативні ризики, отримаємо:

$$O(t) = O_0 + \sum_{k=1}^k \gamma_k^+ r_k^+(t) - \sum_{k=1}^k \gamma_k^- r_k^-(t), \quad (7)$$

Оцінка ризиків та прийняття рішень.

Для прийняття проактивних рішень необхідно оцінити ймовірність виникнення ризиків:

$$D(R_k) = f(E, P). \quad (8)$$

Очікуваний рівень ризику:

$$S[R(t)] = \sum_{k=1}^k D(R_k) \cdot R_k(t). \quad (9)$$

Загальний ризик для підприємства можна визначити як сукупний ризик від усіх процесів:

$$R_{total}(t) = \sum_{k=1}^k w_k r_k(t). \quad (10)$$

де, w_k – ваговий коефіцієнт важливості ризику.

Прогнозування змін та адаптація.

Сценарне моделювання дозволяє оцінити вплив можливих змін зовнішнього середовища:

$$P_{future}(t + \Delta t) = f(E_{forecast}(t + \Delta t)). \quad (11)$$

Застосовуючи методи прогнозування, об'єкт господарювання зможе:

- визначити критичні точки реагування;
- розробляти оптимальні стратегії управління ризиками.

Оптимізація ресурсів.

Для мінімізації негативних впливів і максимізації можливостей використовується критерій ефективності:

$$\max O(t) \text{ при обмеженнях } C(P) \leq C_{max}, \quad (12)$$

де, $C(P)$ – витрати на реалізацію бізнес-процесів; C_{max} – допустимий рівень витрат.

Запропонована математична модель дозволяє кількісно оцінювати вплив зовнішніх факторів на діяльність підприємства та забезпечувати ефективне управління ризиками. Вона допомагатиме об'єкту господарювання:

- адаптуватися до змін середовища;
- визначити критичні точки впливу;

- приймати обґрунтовані рішення для підвищення стійкості бізнесу.

Практичне використання цієї моделі сприятиме оптимізації ресурсів та забезпеченню довгострокової стабільності об'єкта господарювання.

Висновки. Дослідження розвитку зовнішніх впливів на діяльність об'єктів господарювання є важливим елементом забезпечення їхньої стратегічної стабільності в умовах динамічного та невизначеного середовища. У роботі обґрунтовано необхідність використання комплексного підходу до аналізу зовнішніх факторів, які можуть мати як позитивний, так і негативний вплив на бізнес-процеси підприємства.

Запропонована первинна модель дозволяє систематично ідентифікувати зовнішні загрози та можливості, визначати критичні точки бізнес-процесів та приймати проактивні рішення для мінімізації ризиків і використання потенційних переваг. Особливістю моделі є її орієнтація на адаптацію підприємства до змін зовнішнього середовища, що сприяє підвищенню його конкурентоспроможності та стійкості.

Практичне значення моделі полягає в можливості її використання для стратегічного планування, управління ризиками та прийняття обґрунтованих рішень у процесі розвитку підприємства. Інтеграція моделі у систему управління підприємством дозволяє своєчасно реагувати на зовнішні виклики, знижувати рівень невизначеності та формувати ефективні механізми реагування на зміни ринкового середовища.

Математичний апарат, який лежить в основі моделі, дозволяє здійснювати кількісний аналіз впливу зовнішніх впливів та відповідних факторів за допомогою формалізації взаємозв'язків між зовнішніми впливами, бізнес-процесами та похідними ризиками

Завдяки використанню методів ймовірнісного аналізу та функціональних залежностей стає можливим прогнозування ризиків, оцінка їхнього впливу на ключові показники діяльності підприємства та оптимізація управлінських рішень. Запропонована модель сприятиме підвищенню точності прогнозування сценаріїв розвитку та вибору найкращих стратегій реагування, що дозволяє підприємству ефективно адаптуватися до змін середовища.

Таким чином, результати проведеного дослідження є основою для підвищення ефективності управління підприємством, забезпечення його стійкості до зовнішніх впливів та створення умов для стабільного розвитку в умовах постійних змін. Застосування розробленої моделі дозволить підприємствам не лише мінімізувати загрози, а й ефективно використовувати нові можливості для зростання та розвитку.

В подальших дослідженнях розвиток отримає первинна модель яка запропонована в даному дослідження, так як це її первинне представлення. Окрім того буде розпочато створення бази можливих

зовнішніх впливів та проведена ідентифікація похідних ризиків для кожного з них. Також увага буде приділена розробці інструментів для їх оцінки та управління, адже специфіка їх досить широка і вимагатиме наявності відповідних алгоритмів, моделей та методів дослідження.

Список літератури

- Forrester J. *Industrial dynamics*. URL: http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf (дата звернення: 19.01.2025).
- Ковтуненко Ю. В., Васалатій А. Г., Олексійчук Т. М. Фактори зовнішнього середовища, які впливають на вибір стратегії виробничого підприємства. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 11. С. 55–58.
- Starenka O. Risk assessment in the internal control system of an enterprise. Transformation of economics, finance and management in the context of world globalization: Scientific monograph. 2023. P. 179–198. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-307-1-9> (дата звернення: 19.01.2025).
- Орлов М. В., Пасічник В. В. Системне оцінювання ризиків і викликів під час впровадження методології DevOps у корпоративних IT-інфраструктурах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2024. № 3 (34). С. 125–132. URL: <https://doi.org/10.36930/40340316> (дата звернення: 15.01.2025).
- Кошова О. П., Ольховська О. В., Бражніченко А. О. Підвищення ефективності прийняття управлінських рішень в IT-проектах методами імітаційного моделювання. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. № 3. С. 39–50. URL: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.5> (дата звернення: 15.01.2025).
- Рябчиков О. М., Ганущак-Єфіменко Л. М. Використання методів Lean Six Sigma в процесах ризик-менеджменту фреймворка SAFe для підвищення його ефективності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала*. 2024. № 1 (281). С. 42–48. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-42-48> (дата звернення: 12.01.2025).
- 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. URL: <https://doi.org/10.1109/COMSCI55378.2022.9912583> (дата звернення: 12.01.2025).
- 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. URL: <https://doi.org/10.1109/ICRIS52159.2020.00120> (дата звернення: 15.01.2025).
- 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. URL: <https://doi.org/10.1109/ICDSIS61070.2024.10594050> (дата звернення: 15.01.2025).
- Нестеренко В. Ю., Прокопенко М. В., Коваль І. Б. Антикризисне управління в системах ризик-менеджменту та управління економічною безпекою підприємства. *Збірник наукових праць «Проблеми і перспективи розвитку підприємництва»*. 2024. № 32. С. 136–143. URL: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.136> (дата звернення: 15.01.2025).
- Демченко Г. В., Аванесова Н. Е. Інтеграція ризик-менеджменту в загальну стратегію розвитку підприємства. *Збірник наукових праць «Проблеми і перспективи розвитку підприємництва»*. 2024. № 33. С. 38–50. URL: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2023.30.214> (дата звернення: 14.01.2025).

References (transliterated)

- Forrester J. *Industrial dynamics*. Available at: http://www.lapropective.fr/dyn/francais/memoire/autres_textes_de_

- la_prospective/autres_ouvrages_numerises/industrial-dynamics-forrester-1961.pdf (accessed: 19.01.2025).
2. Kovtunenکو Yu. V., Vasalatiy A. H., Oleksiychuk T. M. Faktory zovnishn'oho seredovyschcha, yaki vplyvayut' na vybir stratehiyi vyrobnychoho pidpryyemstva [Factors of the external environment affecting the choice of production enterprise strategy]. *Investytsiyi: praktyka ta dosvid* [Investments: Practice and Experience]. 2016. No. 11, pp. 55–58.
 3. Starenka O. Risk assessment in the internal control system of an enterprise. Transformation of economics, finance and management in the context of world globalization: Scientific monograph. 2023. P. 179–198. Available at: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-307-1-9> (accessed:19.01.2025).
 4. Orlov M. V., Pasichnyk V. V. Systemne otsynuyuvannya ryzykiv i vyklykiv pid chas vprovadzhennya metodolohiyi DevOps u korporatyvnykh IT-infrastruktury [Systematic assessment of risks and challenges in implementing the DevOps methodology in corporate IT infrastructures]. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy* [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]. 2024. No. 3 (34), pp. 125–132. Available at: <https://doi.org/10.36930/40340316> (accessed 15.01.2025).
 5. Koshova O. P., Ol'khovs'ka O. V., Brazhnichenko A. O. Pidvyshchennya efektyvnosti pryuyattya upravlins'kykh rishen' v IT-proektakh metodamy imitatsiyoho modeliuvannya [Increasing the efficiency of managerial decision-making in IT projects using simulation modeling methods]. *Tavriys'kyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky* [Tavriya Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences]. 2024. No. 3, pp. 39–50. Available at: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.5> (accessed 15.01.2025).
 6. Ryabchikov O. M., Hanushchak-Yefimenko L. M. Vykorystannya metodiv Lean Six Sigma v protsesakh ryzyk-menedzhmentu freymvorka SAFe dlya pidvyshchennya yoho efektyvnosti [Application of Lean Six Sigma methods in risk management processes of the SAFe framework to improve its efficiency]. *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dala* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl]. 2024. No. 1 (281), pp. 42–48. Available at: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-42-48> (accessed 12.01.2025).
 7. 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. Available at: <https://doi.org/10.1109/COMSCI55378.2022.9912583> (accessed: 12.01.2025).
 8. 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. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICRIS52159.2020.00120> (accessed: 15.01.2025).
 9. 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. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICDSIS61070.2024.10594050> (accessed: 15.01.2025).
 10. Nesterenko V. Yu., Prokopenko M. V., Koval I. B. Antykrizove upravlinnya v systemakh ryzyk-menedzhmentu ta upravlinnya ekonomichnoyu bezpekoiu pidpryyemstva [Crisis management in risk management systems and enterprise economic security management]. *Zbirnyk naukovykh prats «Problemy i perspektyvy rozvytku pidpryyemnytstva»* [Collection of Scientific Papers "Problems and Prospects of Entrepreneurship Development"]. 2024. No. 32, pp. 136–143. Available at: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.136> (accessed 15.01.2025).
 11. Demchenko H. V., Avanesova N. E. Intehratsiya ryzyk-menedzhmentu v zahal'nu stratehiyu rozvytku pidpryyemstva [Integration of risk management into the overall enterprise development strategy]. *Zbirnyk naukovykh prats «Problemy i perspektyvy rozvytku pidpryyemnytstva»* [Collection of Scientific Papers "Problems and Prospects of Entrepreneurship Development"]. 2024. No. 33, pp. 38–50. Available at: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2023.30.214> (accessed 14.01.2025)

Received (надійшла) 09.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

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

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЇ, ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ТА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Проаналізовано новітні методи та інструменти обчислювального інтелекту, що знайшли широке застосування в різних сферах, зокрема в інформаційних управляючих системах, системах підтримки прийняття рішень, а також у процесах моделювання та дистанційної ідентифікації динамічних систем. Особливу увагу приділено методам, таким як HunyuanVideo, emg2pose, StableAnimator, DEYO, YOLOv11, YOLO-NAS, SynCamMaster, FlowNet, Momentum-GS, Liger-Kernel, Stereo Anywhere та Neural Attention Memory Models. Аналіз показує великий потенціал цих технологій для вдосконалення наявних рішень у сфері обчислювального інтелекту. HunyuanVideo використовує дифузійні моделі для генерації відео, що дозволяє значно покращити візуалізацію та динаміку, водночас зменшуючи вимоги до обчислювальних потужностей. Метод emg2pose та StableAnimator забезпечують високу точність та гнучкість, що особливо важливо для реального часу в системах підтримки прийняття рішень. Із застосуванням технологій, таких як DEYO та YOLOv11, вдалося підвищити швидкість і точність виявлення об'єктів, що має важливе значення для безпеки та моніторингу відео потоків у реальному часі. Методи FlowNet і FlowNet 2.0 для оцінки оптичного потоку дозволяють точно відстежувати рух об'єктів, що значно підвищує точність в обробці динамічних сцен. SynCamMaster забезпечує синхронізацію відео з різних точок зору, що відкриває нові можливості для відновлення 3D-сцен, що демонструється через використання таких технологій, як Momentum-GS. Водночас, спеціалізовані стратегії, такі як Liger-Kernel, активно застосовуються для підвищення ефективності в складних умовах автономних транспортних засобів і робототехніки. Розглянуто необхідність оптимізації обчислювальних процесів для інтеграції цих методів в реальні системи, з акцентом на забезпечення високої точності і швидкості роботи технологій в умовах обмежених ресурсів. Використання цих технологій дозволить створювати інноваційні підходи до вирішення складних задач у реальному часі, що значно покращить ефективність і точність існуючих систем. Таблиці, що додаються, демонструють важливість інтеграції нових технологій у різноманітні сфери досліджень.

Ключові слова: дистанційна ідентифікація динамічних об'єктів, виявлення об'єктів, оптичний потік, ідентифікація швидкості, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі, обробка, відео, система підтримки рішень, обчислювальний інтелект.

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

ANALYSIS OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE METHODS FOR MODELING, IDENTIFICATION, OPTIMIZATION OF SYSTEMS AND DECISION SUPPORT

The latest methods and tools of computational intelligence that have found widespread application in various fields, including information control systems, decision support systems, as well as modeling and remote identification of dynamic system, have been analyzed. Special attention is given to methods such as HunyuanVideo, emg2pose, StableAnimator, DEYO, YOLOv11, YOLO-NAS, SynCamMaster, FlowNet, Momentum-GS, Liger-Kernel, Stereo Anywhere, and Neural Attention Memory Models. The analysis shows the great potential of these technologies for improving existing solutions in the field of computational intelligence. HunyuanVideo uses diffusion models for video generation, significantly improving visualization and dynamics while reducing computational power requirements. The emg2pose and StableAnimator methods provide high precision and flexibility, which are especially important for real-time decision support systems. The application of technologies such as DEYO and YOLOv11 has improved the speed and accuracy of object detection, which is crucial for security and real-time video stream monitoring. The FlowNet and FlowNet 2.0 methods for optical flow estimation allow precise tracking of object motion, significantly improving the accuracy in dynamic scene processing. SynCamMaster synchronizes video from different viewpoints, opening up new opportunities for 3D scene reconstruction, demonstrated through the use of technologies like Momentum-GS. At the same time, specialized strategies such as Liger-Kernel are actively applied to enhance efficiency in complex environments like autonomous vehicles and robotics. The necessity of optimizing computational processes for integrating these methods into real-world systems is discussed, with a focus on ensuring high precision and speed of technology operation under resource constraints. The use of these technologies will enable the creation of innovative approaches to solving complex real-time problems, significantly improving the effectiveness and accuracy of existing systems. The included tables demonstrate the importance of integrating new technologies into various research fields.

Keywords: remote identification of dynamic objects, object detection, optical flow, speed identification, deep learning, convolutional neural networks, processing, video, decision support system, computational intelligence.

Вступ. Сучасні розробки у сфері обчислювального інтелекту активно втілюються в різноманітних сферах від інформаційних управляючих систем до систем підтримки прийняття рішень, моделювання та дистанційної ідентифікації динамічних систем.

Методи штучного інтелекту (ШІ) проаналізовані у багатьох роботах, де підкреслюється їх роль у розвитку адаптивних систем, здатних реагувати на зміни в навколишньому середовищі, а також у створенні нових підходів до вирішення складних задач, таких як прогнозування, класифікація та оптимізація [1, 2]. ШІ дозволяє ефективно обробляти великі обсяги даних, що суттєво підвищує точність рішень, зокрема в таких галузях, як медицина, енергетика, матеріалознавство та автоматизація.

Важливим аспектом є інтеграція ШІ з іншими обчислювальними методами, що дозволяє створювати багатофункціональні моделі для розв'язання міждисциплінарних проблем і розробки інтелектуальних систем для управління складними процесами [1, 2].

Розглянуто сучасні алгоритми ШІ, такі як пошук горобців, гібридна оптимізація метеликів, ліс ізоляції на основі механізму уваги, ідентифікація надмірності на основі кластеризації, градієнтно-підсилене регресійне дерево для прогнозування геотермального теплового потоку, методи на основі векторів підтримки, рішення для моделювання хаотичної поведінки, використання багатомодельних підходів для розпізнавання та класифікації, оцінка якості генеративних моделей, моделі прогнозування

поведінки користувачів, підкріплювальне навчання та методи класифікації для моделювання й оптимізації складних систем та багато інших [1]. Особливу увагу приділено застосуванню машинного навчання в матеріалознавстві для прогнозування властивостей матеріалів, що дозволяє проводити високошвидкісні та ефективні симуляції. Ці підходи значно перевершують традиційні методи молекулярної динаміки.

У сфері енергетики застосування обчислювальних методів спрямоване на оптимізацію процесів виробництва енергії та розробку нових матеріалів для акумуляторів. Наприклад, використання нейронних мереж для прогнозування ефективності фотоелементів або алгоритмів оптимізації для покращення теплових характеристик матеріалів. Інноваційні підходи до виробництва гнучких матеріалів з негативною провідністю мають перспективи для використання в системах екранування та накопичення енергії.

ШІ також стає ключовим елементом у створенні автономних систем, здатних адаптуватися до змін середовища. Це включає розробку систем розпізнавання образів, наприклад, для контролю температури в промислових процесах або аналізу стану матеріалів у реальному часі.

Гібридні алгоритми, такі як алгоритм пошуку горобців, значно підвищують точність прогнозування. Високопродуктивні обчислення дозволяють вирішувати масштабні задачі, зокрема оптимізацію енергетичних систем у реальному часі. Це забезпечує ефективність і точність у складних процесах. Таким чином, інтеграція ШІ та обчислювальних методів відкриває нові горизонти для аналізу, моделювання та оптимізації складних систем, створюючи основу для розробки інтелектуальних рішень у багатьох галузях науки і техніки [2]. Перспективними напрямками є подальше дослідження методів навчання з підкріпленням, а також розробка мультидисциплінарних підходів, що включають фізичні, математичні та інженерні аспекти [1, 2].

В останній час розроблено багато ефективних методів обчислювального інтелекту, які відрізняються сферами застосування та особливостями й можуть бути застосовані для розв'язання широкого кола практичних задач. В напрямі інформаційних систем і технологій актуальна проблема детального аналізу можливостей найновіших методів обчислювального інтелекту для взаємопов'язаних напрямків моделювання, ідентифікації, оптимізації динамічних систем та підтримки прийняття рішень. Тому для порівняльного аналізу використання методів обчислювального інтелекту для вказаних напрямків обрані методи: HunyuanVideo [3], emg2pose [4], StableAnimator [5], DEYO [6], і YOLOv11 [7], YOLO-Neural Architecture Search (NAS) [8], SynCamMaster [9], FlowNet [10-11], Momentum-GS [12], Liger-Kernel [13], Stereo Anywhere [14] та система Neural Attention Memory Models [15], які мають потужний потенціал

для вдосконалення технологій у зазначених областях, що демонструється в результатах сучасних досліджень та їхніх застосуваннях у реальних системах [2, 16].

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз сучасних методів та систем обчислювального інтелекту для їх використання в напрямках:

1) моделювання та оптимізація інформаційних управляючих систем на основі обчислювального інтелекту (МОІУСООІ);

2) моделі, методи та інформаційна технологія дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів (ММІТДІПДО) [2, 16];

3) інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень для оптимізації процесів керування (ІСППРОПК).

На основі вищезгаданих методів можна визначити ряд актуальних наукових задач:

1) оптимізація обчислювальних процесів, що полягає в ефективному застосуванні квантизаційно-обізнаних модулів та гібридних архітектур для зменшення обчислювальних витрат при забезпеченні високої точності;

2) моделювання та аналіз складних систем на основі застосування методів синхронізованого відео для створення точних симуляцій складних систем, таких як транспортні потоки чи роботизовані платформи;

3) удосконалення процесів ідентифікації та відновлення, визначення підходів, що забезпечують найбільшу точність при ідентифікації об'єктів на основі відео та відновленні 3D-сцен з врахуванням обмежень обчислювальних ресурсів;

4) інтеграція глибокого навчання в системи реального часу, забезпечення інтеграції передових методів, таких як FlowNet та Liger-Kernel, для забезпечення роботи в реальному часі в складних умовах управління та підтримки прийняття рішень.

Значним викликом є ефективне використання технологій обчислювального інтелекту для вирішення задач в реальних системах, таких як моніторинг об'єктів, відновлення 3D-сцен та управління транспортними потоками. Для цього необхідно оптимізувати обчислювальні процеси та інтегрувати передові методи ШІ для досягнення високої точності та швидкості виконання.

Дослідження таких систем потребує розвитку нових підходів для забезпечення точних прогнозів і підтримки рішень у реальному часі.

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

Короткий опис методів. У табл. 1 наведено обрані для дослідження методи та їх загальний опис, особливості та сфери застосування.

Таблиця 1 – Методи та їх загальний опис, особливості, сфера застосування

Методи	Загальний опис	Особливості	Сфера застосування
HunyuanyuanVideo	Аналіз відеоданих для моніторингу та оптимізації систем.	Підтримка великих обсягів даних, інтеграція із III.	Моніторинг процесів, аналіз поведінки об'єктів, контроль ситуацій у реальному часі.
emg2pose	Конвертація електроміографічних даних у пози користувача чи об'єкта.	Використання біометричних даних, висока точність розпізнавання рухів.	Аналіз рухів, медичні системи, спортивний аналіз, керування через жести.
StableAnimator	Інструмент для створення анімації складних процесів.	Анімовані візуалізації, підтримка симуляційних даних.	Візуалізація, навчання, симуляція сценаріїв.
DEYO	Система детекції об'єктів у реальному часі.	Висока швидкість обробки, ефективне виявлення об'єктів навіть у складних умовах.	Системи безпеки, аналіз поточкових даних, ідентифікація цілей.
YOLOv11	Сучасна версія моделі для швидкого виявлення об'єктів.	Швидкість, компактність, висока точність навіть для дрібних об'єктів.	Автономний транспортні засоби, промислові системи, аналіз відеопотоків.
YOLO-NAS	Покращений алгоритм виявлення об'єктів з інтеграцією NAS.	Оптимізована архітектура, ефективність у використанні ресурсів.	Робототехніка, автоматизовані системи спостереження, контроль виробничих процесів.
SynCamMaster	Генерація синтетичних даних для моделювання та навчання моделей.	Створення штучних даних, масштабованість.	Навчання моделей, перевірка алгоритмів, симуляція реальних ситуацій.
FlowNet	Аналіз оптичного потоку для оцінки руху об'єктів.	Висока точність оцінки руху, підтримка реального часу.	Моніторинг, візуалізація руху, аналіз відеопотоків.
FlowNet 2.0	Покращена версія FlowNet з більш високою точністю та ефективністю.	Багаторівневий аналіз руху, адаптація до різних умов.	Аналіз складних рухів у відео, високоточний контроль у виробничих процесах.
Momentum-GS	Модель аналізу динамічних характеристик траєкторій об'єктів.	Використання імпульсних моделей, точність для динамічних систем.	Автономні системи керування, симуляція руху об'єктів, оптимізація маршрутів.
Liger-Kernel	Ядро для оптимізації процесів у моделях III.	Гнучкість, сумісність із різними типами даних.	Побудова адаптивних рішень, оптимізація систем керування.
Stereo Anywhere	Технологія аналізу стереоскопічних зображень для оцінки глибини та дистанції.	Робота з 3D-зображеннями, точне визначення глибини.	Робототехніка, системи автоматичного водіння, аналіз будівельних структур.
Neural Attention Memory Models	Моделі з нейронною пам'яттю для контекстного аналізу даних.	Збереження важливої інформації, контекстна релевантність.	ІСППРОПК, рекомендації, аналіз даних великого обсягу.

Метод HunyuanyuanVideo є важливим внеском у обчислювальний інтелект завдяки використанню дифузійних моделей для генерації відео, забезпечуючи високу якість візуалізації, збереження динаміки рухів і текстуро-відео узгодження, що дозволяє знижувати витрати на обчислювальні ресурси та застосовувати технологію у різних умовах [3].

Метод emg2pose використовує поверхневу електроміографію (sEMG) для сенсорної інтеграції та високоточного контролю в інтелектуальних системах управління, забезпечуючи адаптивність до змін умов, моніторинг та ідентифікацію рухів, а також аналіз параметрів динамічних об'єктів у реальному часі [4].

StableAnimator. StableAnimator використовує глибинне навчання та дифузійні моделі, застосовуючи розв'язання рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана (HJB) для високоточних анімацій та покращення систем підтримки прийняття рішень через узгодженість просторово-часових характеристик [5].

DEYO, YOLOv11, YOLO-NAS. DEYO поєднує методи DETR та YOLO для ефективного детектування об'єктів у реальному часі, YOLOv11 вдосконалює візуальне розпізнавання з покращеними механізмами уваги та мультизадачності, а YOLO-NAS оптимізує

точність і швидкість виконання завдяки квантизаційно-обізнаним модулям та автоматичному проектуванню архітектури [2, 6-8, 16].

SynCamMaster є методом синхронізованої генерації відео з різних точок зору, який використовує модифікацію попередньо натренованої моделі text-to-video для точного моделювання складних систем і аналізу динаміки об'єктів [9].

FlowNet і FlowNet 2.0 є методами для оцінки оптичного потоку, які точно визначають рух об'єктів між кадрами відео, що корисно для задач дистанційної ідентифікації та моделювання інформаційно-управляючих систем [10-11].

Momentum-GS є підходом для відновлення великих 3D-сцен, що поєднує гібридні представлення та імпульсну самодистилляцію, забезпечуючи високі результати, просторову узгодженість та ефективне використання обчислювальних ресурсів [12].

Liger-Kernel оптимізує обчислення за допомогою злиття операцій і спеціалізованих ядер, знижуючи затримки обчислень, що важливо для реальних систем, таких як автономні транспортні засоби чи роботизовані платформи [13].

Stereo Anywhere поєднує традиційну стереогеометрію з сучасними глибокими моделями для оцінки глибини в складних умовах, забезпечуючи високу точність в різноманітних сценаріях [14].

Методи та їх використання за напрямками дослідження. У табл. 2 наведено методи та можливості їх використання за визначеними напрямками дослідження.

Таблиця 2 – Методи та їх використання за напрямками дослідження

Методи та їх використання	Теми		
	МОІУСООІ	ММІТДПДО	ІСППРОПК
HunyuanyVideo	Використання відеоаналітики для моніторингу стану інформаційних систем.	Аналіз відеоданих для дистанційної ідентифікації параметрів об'єктів.	Застосування відеоданих для підтримки прийняття рішень.
emg2pose	Оптимізація управління системами на основі аналізу рухів.	Ідентифікація динамічних об'єктів за допомогою аналізу поз.	Використання рухів як додаткового параметра для прийняття рішень.
StableAnimator	Анімовані візуалізації для моделювання процесів управління.	Візуалізація дистанційно ідентифікованих параметрів.	Візуалізація сценаріїв прийняття рішень.
DEYO, YOLOv11, YOLO-NAS	Моделі виявлення об'єктів для автоматизованого управління.	Використання для ідентифікації об'єктів у реальному часі.	Аналіз об'єктів як частина підтримки рішень.
SynCamMaster	Моделювання віртуального середовища для тестування систем.	Синтетичні дані для ідентифікації параметрів.	Симуляція сценаріїв прийняття рішень.
FlowNet, FlowNet 2.0	Аналіз потоку даних для оптимізації систем.	Використання потокового аналізу для ідентифікації динаміки об'єктів.	Потокові дані як основа прийняття рішень.
Momentum-GS	Аналіз траєкторій для оптимізації керуючих систем.	Розрахунок імпульсів для ідентифікації.	Використання динамічних характеристик для рішень.
Liger-Kernel	Ядра для побудови оптимізованих систем.	Адаптивні моделі для ідентифікації об'єктів.	Побудова гнучких рішень.
Stereo Anywhere	Стереоскопічний аналіз для моделювання.	Дистанційна ідентифікація за допомогою стереозображень.	Використання стереоаналізу в підтримці рішень.
Neural Attention Memory Models	Моделювання систем з акцентом на релевантних даних.	Використання пам'яті для точного визначення параметрів.	Оптимізація рішень завдяки контекстному аналізу.

HunyuanyVideo. Для МОІУСООІ HunyuanyVideo представляє значний внесок у сферу обчислювального інтелекту завдяки використанню дифузійних моделей для генерації відео. Цей підхід базується на масштабованій архітектурі, що забезпечує високу якість візуалізації, динаміки руху та текстово-відео узгодження. Модель оптимізована для ефективного використання обчислювальних ресурсів через вдосконалені стратегії навчання, що дозволяє знизити витрати на апаратне забезпечення. У контексті інформаційних управляючих систем, HunyuanyVideo може бути використана для моделювання складних динамічних сценаріїв, симуляцій процесів або створення мультимедійних середовищ для підтримки прийняття рішень [3].

Для ММІТДПДО HunyuanyVideo демонструє потенціал у створенні відео з високою точністю відображення динамічних процесів, що має пряме застосування для дистанційної ідентифікації. Завдяки можливості роботи з масштабними наборами даних і генерації реалістичних рухів, метод може бути адаптований для виявлення та аналізу параметрів динамічних об'єктів на основі відеоданих. Наприклад, у системах відеоспостереження чи моніторингу складних об'єктів HunyuanyVideo може підтримувати

автоматичну генерацію й аналіз контенту для підвищення точності виявлення.

Для ІСППРОПК інтеграція таких моделей, як HunyuanyVideo, у системи підтримки прийняття рішень може істотно покращити візуалізацію сценаріїв і підготовку даних для аналізу. Особливості моделі, включаючи текстово-відео узгодження та автоматичний поділ сцен, роблять її цінним інструментом для створення інтерактивних платформ, які допомагають аналізувати складні сценарії та приймати оптимальні рішення. Наприклад, її можна використовувати для тренування операторів, симуляції кризових ситуацій чи аналізу поведінкових сценаріїв.

Відкритий код. Зменшує розрив між комерційними й дослідницькими спільнотами, сприяючи інноваціям. Масштабованість. Підтримує роботу з великими обсягами даних, забезпечуючи високу ефективність. Якість генерації. Переважає багато закритих моделей у візуалізації та динаміці. Різноманіття застосувань. Підтримка створення відео з тексту, відео до аудіо й інших завдань.

HunyuanyVideo є революційною технологією, яка має застосування в МОІУСООІ, ММІТДПДО, ІСППРОПК.

Emg2pose. Для МОЙСООІ забезпечує нові можливості сенсорної інтеграції для розробки високоточного контролю. Поверхнева електроміографія (sEMG) дозволяє вимірювати електричні сигнали, що генеруються м'язами, і перетворювати їх у пози рук у реальному часі. Це вдосконалює точність і надійність систем управління. Високу адаптивність до умов використання завдяки великій кількості зібраних даних (193 користувачі, 370 годин записів). Це сприяє створенню універсальних моделей, здатних до генералізації. Реалізація в реальному часі, яка є ключовою для інтерактивних систем, таких як системи управління роботами або адаптивні інтерфейси [4].

Для ММІТДПДО sEMG як основа для ідентифікації рухів. Метод використовує 16-канальні sEMG-сенсори для ідентифікації позицій рук, аналізуючи активність м'язів у режимі реального часу. Віддалена ідентифікація. Завдяки сенсорній технології sEMG та алгоритмам аналізу великих даних, можна виявляти рухи без необхідності візуального контакту (як у комп'ютерному зорі), що усуває проблеми з затемненням чи поганим освітленням. Набір даних emg2pose забезпечує тренування моделей для роботи з новими користувачами та змінами розташування сенсорів, що важливо для оптимізації віддаленої ідентифікації.

Для ІСППРОПК універсальність і гнучкість emg2pose дозволяє створювати системи підтримки прийняття рішень, що враховують індивідуальні особливості користувачів (анатомія, положення сенсорів). Застосування машинного навчання. Включає конкурентоспроможні базові моделі, які використовують сучасні архітектури (LSTM, 3D Convolutional Networks). Це дозволяє ефективно інтегрувати рішення в інтелектуальні системи. Інтерфейси людина-комп'ютер. Сприяє розвитку природних способів взаємодії з системами (наприклад, у AR/VR), що підвищує ефективність роботи. Найбільший відкритий набір даних для sEMG з високою якістю та деталізацією. Реалізація в реальному часі. Важливо для інтерактивних і динамічних систем. Моделі здатні враховувати анатомічні та поведінкові відмінності користувачів. Залежність від якісного обладнання. Потреба у високотехнологічних сенсорах (sEMG-RD), що може обмежити застосування у деяких середовищах. Складність генералізації. Незважаючи на масштабність даних, існують труднощі з узагальненням на нові рухи чи нестандартні сценарії.

StableAnimator. Для МОЙСООІ StableAnimator використовує методи глибинного навчання та дифузійні моделі, які є прикладами обчислювального інтелекту, для створення високоякісної анімації. Це демонструє інтеграцію оптимізаційних процесів, таких як рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана (HJB), для досягнення балансу між якістю зображення та збереженням ідентичності. Оптимізація процесу дифузії за допомогою розв'язання HJB-рівняння. Інноваційні архітектурні модулі, як-от

глобальний контент-орієнтований Face Encoder та Distribution-aware ID Adapter, які покращують узгодженість між просторовими та часовими характеристиками.

Для ММІТДПДО StableAnimator використовує дані зображення та послідовності поз для віддаленої ідентифікації динамічних параметрів (пози, рухи). Метод базується на адаптивних вбудованих представленнях, що інтегрують інформацію про обличчя та фон для забезпечення точності анімації. Використання Arcface для обчислення ембедінгів обличчя. Інтеграція просторово-часових характеристик для уникнення спотворень динамічних параметрів. Забезпечення високої ідентичності анімованих кадрів за допомогою узгодження характеристик через адаптацію розподілу.

Для ІСППРОПК метод демонструє застосування інтелектуальних рішень у контексті керування процесами анімації, де кожний етап обробки інтегрує автоматизоване прийняття рішень для оптимізації вихідного результату. Контроль генерації через багаторівневу оптимізацію ембедінгів. Інтеграція адаптивного моделювання через обмеження дифузійного шляху з використанням HJB-рівняння. Використання метрик, таких як CSIM і FVD, для оцінювання ідентичності та якості відео [5].

DEYO (DETR with YOLO). Для МОЙСООІ DEYO оптимізує процес навчання та детектування об'єктів завдяки унікальній "пошаговій" стратегії тренування, яка. Використовує вже наперед підготовлену мережу YOLO для генерації високоякісних початкових параметрів, зменшуючи залежність від великих обсягів додаткових даних. Знижує витрати на обчислювальні ресурси, забезпечуючи тренування другої фази лише на 8 ГБ VRAM. Це дозволяє використовувати метод у реальному часі, навіть на обмежених апаратних ресурсах. Досягає швидкості 497 FPS (DEYO-tiny) та високої точності, що ідеально підходить для управління системами реального часу. Ця ефективність може бути застосована в моделях систем керування, де потрібна швидка і точна ідентифікація об'єктів у складних умовах. Для ММІТДПДО DEYO забезпечує точну локалізацію об'єктів у реальному часі, що критично для. Моніторингу динамічних об'єктів у віддалених системах (наприклад, у безпілотних апаратах або автономному транспорті). Використання багатомасштабних ознак YOLO для підвищення якості детектування в складних сценах. Відсутність потреби у післяобробці (Non-Maximum Suppression) забезпечує стабільність швидкості роботи, навіть у складних умовах, таких як аналіз натовпу (наприклад, CrowdHuman).

Для ІСППРОПК DEYO може стати основою для інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Інтеграція високоточних прогнозів об'єктів у системи прийняття рішень дозволяє автоматизувати процеси, що потребують високої швидкості реакції.

Використання трансформерної архітектури для оптимізації передбачень сприяє зменшенню

складності аналізу та підвищенню якості ухвалених рішень. Пропонує інструменти для створення адаптивних моделей, що працюють у реальному часі з мінімальними затримками [6].

YOLOv11. Для МОЙСООІ YOLOv11 може бути використаний для побудови високопродуктивних інформаційних управляючих систем, особливо у задачах, пов'язаних з візуальним розпізнаванням та аналізом. Завдяки різним моделям (nano до extra-large), YOLOv11 можна інтегрувати в системи з різними ресурсними обмеженнями, включаючи IoT-пристрої та високопродуктивні сервери. Ця властивість сприяє оптимізації систем управління, що потребують реального часу, таких як робототехнічні системи чи автономні транспортні засоби. Архітектурні інновації. Нові блоки (C3k2, SPPF, C2PSA) забезпечують кращу обробку та витягування ознак, що сприяє більш точному прийняттю управлінських рішень у складних умовах. Покращені механізми уваги. C2PSA дозволяє моделі фокусуватися на критичних ділянках зображення, що є важливим для точного аналізу динамічних об'єктів. Для ММІТДПДО YOLOv11 є перспективним інструментом для дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів. Продуктивність у реальному часі. Наномодель YOLOv11 забезпечує високу швидкість обробки кадрів (FPS) при незначному збільшенні кількості параметрів, що ідеально підходить для мобільних платформ або дронів. Мультизадачність. YOLOv11 підтримує сегментацію, класифікацію та оцінку позицій об'єктів, що робить його універсальним для комплексних динамічних сценаріїв. Покращена здатність до обробки складних візуальних даних. Інтеграція механізмів просторової уваги покращує точність навіть для частково закритих чи складних об'єктів. Для ІСППРОПК YOLOv11 може слугувати ключовим елементом у побудові інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Підтримка різних сценаріїв. Завдяки універсальності, YOLOv11 може використовуватись у різних галузях, від автоматизації промисловості до систем безпеки. Оптимізація управління. Модель здатна забезпечити швидкий і точний аналіз візуальної інформації, що дозволяє системам підтримки прийняття рішень швидше адаптуватися до змін. Імплементація в реальних умовах. Поліпшення продуктивності та багатозадачності дозволяє інтегрувати YOLOv11 у рішення для складних операційних середовищ, таких як контроль за транспортом чи медичні аналізи [7].

YOLO-NAS. Є сучасним методом для виявлення об'єктів, який поєднує в собі автоматичне проектування архітектури, високу точність, продуктивність та ефективність обчислень. Цей метод, розроблений компанією Deci. Квантизаційно-обізнані модулі (Quantization Aware Modules). Використання модулів QSP та QCI, що забезпечують мінімізацію втрат точності під час післятренувальної квантизації (Post-Training Quantization, PTQ). Ці модулі

дозволяють ефективно виконувати обчислення з низькою розрядністю (8-bit), що особливо корисно для пристроїв з обмеженими ресурсами, таких як роботи чи IoT-пристрої. Автоматичне проектування архітектури (AutoNAC). AutoNAC дозволяє адаптувати архітектуру моделі до конкретних завдань, включаючи вимоги до продуктивності, апаратного забезпечення та середовища виконання. Забезпечує оптимальний баланс між затримкою (latency) та пропускну здатністю (throughput). Гібридна квантизація. Методика дозволяє вибірково квантизувати частини моделі, балансує між затримкою обчислень та точністю розпізнавання. Це підвищує ефективність у задачах реального часу, таких як виявлення динамічних об'єктів у транспортних системах чи логістиці. Попереднє тренування на великих наборах даних. Модель навчалась на наборах Objects365 (2 мільйони зображень, 365 категорій) та COCO, що дозволило отримати високий рівень узагальнення для реальних сценаріїв. Архітектурні інновації. Інтеграція блоків RepVGG забезпечує сумісність із квантизаційними підходами, підвищуючи гнучкість у використанні різних апаратних платформ. Створено три архітектури (YOLO-NASS, YOLO-NASM, YOLO-NASL), які відрізняються глибиною і розташуванням блоків QSP та QCI. Прецизійні варіанти (FP32, FP16, INT8). Підтримка різних форматів з плаваючою комою дозволяє ефективно працювати як на високопродуктивних серверах, так і на мобільних пристроях.

Для МОЙСООІ завдяки високій швидкості обробки та можливості роботи на обмежених пристроях, YOLO-NAS може використовуватись для аналізу інформаційних потоків, виявлення змін у режимах роботи системи та управління складними процесами.

Для ММІТДПДО метод забезпечує високу точність у виявленні дрібних об'єктів і покращену локалізацію, що критично для задач моніторингу транспортних систем, дронів чи інших мобільних платформ.

Для ІСППРОПК YOLO-NAS може інтегруватись у системи підтримки прийняття рішень, забезпечуючи швидке та точне виявлення об'єктів для підвищення ефективності управлінських процесів, наприклад у промисловості, охороні чи логістиці [8].

SynCamMaster. SynCamMaster є методом, який дозволяє синхронізовану генерацію відео з різних точок огляду. Це досягається за допомогою модифікації попередньо натренованої моделі text-to-video. Даний метод знаходить застосування у віртуальному знімальному процесі, забезпечуючи динамічну та геометричну узгодженість між різними перспективами.

Для МОЙСООІ методи, подібні SynCamMaster, можуть бути використані для моделювання сценаріїв керування. Генерація багатокамерних відео дозволяє створювати симуляції складних систем, забезпечуючи огляд з різних точок зору. Узгодженість між точками

зору забезпечує точність моделювання і прийняття рішень.

Для ММІТДПДО Ідентифікація динамічних об'єктів. Система здатна генерувати багатокамерні відео, що дозволяє аналізувати динаміку об'єкта з декількох ракурсів. Розширення баз даних для тренування. Гібридний підхід до навчання з використанням віртуального рендерингу допомагає створювати навчальні набори для алгоритмів ідентифікації.

Для ІСППРОПК Візуалізації сценаріїв. Генерація відео з різних точок дозволяє оцінювати наслідки управлінських рішень у динаміці. Переваги SynCamMaster. Аналізу даних. Геометрично узгоджені відео сприяють кращому розумінню складних систем. Інтеграція з існуючими моделями. Plug-and-play модуль дозволяє легко розширювати можливості текстово-відео моделей. Узгодженість між перспективами. Модуль синхронізації забезпечує стабільність і точність між різними точками огляду. Гібридний підхід до навчання. Поєднання реальних даних з віртуальними дозволяє покращити генерацію відео в різних умовах [9].

FlowNet. Для MOIUCOOI FlowNet показує, як методи обчислювального інтелекту, зокрема нейронні мережі, можуть бути використані для оптимізації систем обробки зображень.

Архітектура FlowNet. Метод пропонує дві архітектури. FlowNetSimple — стандартна нейромережа, що приймає два зображення як вхід та самостійно вирішує, як отримувати інформацію про рух. FlowNetCorr — архітектура з додатковим "кореляційним шаром", який явно порівнює відповідні області двох зображень. Це нагадує процес знаходження відповідей між точками в класичних методах. Вплив архітектури на продуктивність. Включення кореляційного шару покращує здатність мережі навчатися знаходити відповідності між зображеннями, що дозволяє ефективніше моделювати рух між кадрами.

Для ММІТДПДО FlowNet може бути застосований для задач дистанційної ідентифікації об'єктів, які змінюють положення, завдяки здатності точно оцінювати рух між послідовностями зображень. Генерація навчальних даних. Оскільки реальних датасетів для оптичного потоку недостатньо, було створено синтетичний набір даних Flying Chairs, що імітує рухи об'єктів у контрольованих умовах. Хоча ці дані менш реалістичні, вони дозволяють мережам генерувати узагальнені моделі, які демонструють хорошу продуктивність на реальних наборах даних, таких як KITTI або Sintel. Швидкість роботи. Використання FlowNet дозволяє досягати продуктивності до 10 кадрів на секунду, що важливо для реального часу, наприклад, у безпілотних транспортних засобах чи робототехніці.

Для ІСППРОПК методи, подібні до FlowNet, можуть бути інтегровані в системи підтримки рішень для оптимізації керування динамічними об'єктами. FlowNet використовує принцип "кінець-у-кінець"

(end-to-end learning), що дозволяє моделі вчитися на основі великих наборів даних без необхідності ручного налаштування параметрів. Це робить метод універсальним для різних задач. Метод використовує "апконволюційні" шари для збільшення роздільної здатності вихідних карт руху. Це дозволяє інтегрувати як локальну, так і глобальну інформацію.

Підходить для реального часу. Універсальність у застосуванні до різних наборів даних. Можливість інтеграції в системи інтелектуальної підтримки рішень. Потреба у великих наборах навчальних даних для досягнення високої точності [10].

FlowNet 2.0. Ключові переваги FlowNet 2.0. Точність. Архітектура з використанням стекування мереж і шарів врахування малих зміщень дозволяє досягти високої деталізації та зменшення похибки оцінки потоку. Швидкість. Обробка у режимі до 140 кадрів на секунду дозволяє інтегрувати систему у реальні додатки. Гнучкість. Архітектура підтримує широкий спектр завдань, від аналізу великих до малих зміщень, що забезпечує універсальність для різних сценаріїв. Ефективне навчання. Використання різних наборів даних і стратегій тренування значно покращує якість і швидкість роботи моделі.

Для MOIUCOOI FlowNet 2.0 демонструє, як глибоке навчання може бути використане для оцінки оптичного потоку — завдання, яке потребує точного аналізу динаміки об'єктів у відеопослідовностях. Використовуючи архітектуру глибоких нейронних мереж, FlowNet 2.0 вдосконалює попередню версію, додаючи механізми оптимізації, такі як багаторівневі тренувальні набори, стекування мереж та врахування малих зміщень. Ці вдосконалення сприяють підвищенню точності й швидкості обчислень. У контексті моделювання інформаційних управляючих систем FlowNet 2.0 можна розглядати як приклад застосування обчислювального інтелекту для обробки великих масивів даних і забезпечення точного управління рухомими об'єктами.

Для ММІТДПДО FlowNet 2.0 використовує енд-то-енд підхід для ідентифікації параметрів руху об'єктів на основі аналізу пар зображень. Завдяки адаптивному тренуванню та архітектурі з включенням шарів для врахування малих зміщень, модель забезпечує точність навіть для невеликих переміщень і складних реальних умов. У контексті дистанційної ідентифікації це може бути використано для створення систем спостереження та контролю, що дозволяють аналізувати динамічні об'єкти на основі зображень, отриманих із віддалених сенсорів або камер.

Для ІСППРОПК FlowNet 2.0 забезпечує інтерактивну швидкість обробки до 140 кадрів на секунду, що є важливим для реальних систем підтримки прийняття рішень. Завдяки швидкому та точному оцінюванню оптичного потоку, система може бути інтегрована в платформи, які приймають рішення в режимі реального часу, наприклад, в управлінні автономними транспортними засобами чи в системах автоматизованого виробництва. Використання

навчальних наборів із поступовим ускладненням завдань також є ключовим елементом для підвищення адаптивності та точності системи [11].

Momentum-GS. Momentum-GS є новим підходом до відновлення великих 3D-сцен, що базується на комбінуванні гібридних представлень та механізмів самодистиляції з використанням імпульсу (momentum). Цей метод демонструє високі результати у задачах відновлення, оптимізації та управління складними об'єктами. Основні особливості методу. Гібридні представлення. Метод використовує комбінацію явних та неявних характеристик, зокрема щільних воксельних сіток та розріджених 3D-гаусіанів. Це забезпечує високу точність відновлення та ефективність обчислень. Механізм імпульсної самодистиляції. Введено поняття "вчителя" — Gaussian-декодера, який оновлюється з урахуванням імпульсу. Він слугує глобальним орієнтиром для "студентів" — блоків, що навчаються. Кожен блок отримує глобальні вказівки, що сприяє просторовій узгодженості відновленої сцени. Динамічне регулювання ваг блоків залежно від якості їх реконструкції дозволяє приділяти більше уваги слабким ділянкам сцени. Паралельне навчання. Метод знімає обмеження на кількість блоків, які можна обробити одночасно, дозволяючи масштабувати задачі відновлення на обмеженій кількості GPU. Підхід включає періодичний відбір підмножин блоків для розподілу між GPU, що оптимізує використання обчислювальних ресурсів. Адаптивна вага блоків. Запропонована стратегія динамічного зважування блоків ґрунтується на якості їх реконструкції. Це дозволяє коригувати модель у напрямку слабких зон, підвищуючи загальну консистентність сцени.

Для MOIYCOOI Momentum-GS може бути адаптований для побудови моделей складних систем, наприклад, інформаційно-управляючих систем, де важливо зберігати узгодженість між частинами системи.

Для ММІТДПДО метод забезпечує точність і стабільність при аналізі великих об'єктів, наприклад, в задачах моніторингу динамічних об'єктів у реальному часі.

Для ІСППРОПК може бути корисним для моделювання великих та складних сцен, таких як інтерактивні моделі управління [12].

Liger-Kernel. Для MOIYCOOI Liger-Kernel застосовує методи оптимізації GPU-ядер, такі як злиття операцій (operation fusion), що зменшує затримки обчислень і використання пам'яті. Прискорення роботи алгоритмів обчислювального інтелекту. Злиття обчислень у трансформерних моделях дозволяє реалізувати оптимальні стратегії планування та управління в реальному часі. Розробки систем із низьким енергоспоживанням. Ефективне використання пам'яті GPU сприяє зниженню енергоспоживання обчислювальних кластерів.

Для ММІТДПДО Liger-Kernel може бути використана для обробки великої кількості даних в

реальному часі. Оптимізація обчислювальної ефективності для ідентифікації параметрів динамічних об'єктів. Використання RMSNorm і LayerNorm для нормалізації даних забезпечує стабільність алгоритмів, які аналізують вхідні сигнали з сенсорів. Інтеграція алгоритмів дистанційної ідентифікації у великі системи. Використання Triton-оптимізованих ядер для трансформації та аналізу даних, зібраних з динамічних систем (дронів, роботів).

Для ІСППРОПК Прискорення навчання LLM для прийняття рішень. Використання Liger-Kernel знижує обчислювальні витрати, що дозволяє швидше розробляти моделі підтримки прийняття рішень.

Адаптація до різних середовищ обчислень. Завдяки інтеграції з платформами PyTorch, DeepSpeed і Triton, розробники можуть легко адаптувати систему для специфічних потреб, таких як управління виробничими процесами чи аналіз бізнес-даних [13].

Stereo Anywhere. Метод Stereo Anywhere представляє інноваційний підхід до стерео-відповідності, який об'єднує традиційні геометричні принципи стерео з глибокими нейронними моделями Vision Foundation Models (VFM) для монокулярної оцінки глибини. Ця методика вирішує ключові проблеми сучасних стерео-моделей: обмежена узагальненість в різних сценаріях та труднощі з глибокою ідентифікацією на текстурно-бідних поверхнях, при оклюзіях і на неламбертових поверхнях.

Основні компоненти Stereo Anywhere Метод базується на трьох основних етапах. Екстракція ознак. Мережа використовує попередньо натреновані моделі для отримання ознак з пар зображень та їх глибинних карт, генерованих VFM. Побудова кореляційних пірамід. Конструюються дві кореляційні об'ємні структури — одна для стерео відповідностей, інша для монокулярних нормалей глибини. Це дозволяє поєднати інформацію про текстуру і геометрію. Ітеративна оцінка диспаритету. Зібрані ознаки використовуються для уточнення карти диспаритету за допомогою новітніх архітектур глибокого навчання. Інновації методу. Злиття монокулярних і стерео сигналів. Метод поєднує дані з VFM для монокулярної глибини з традиційною стерео-геометрією. Це забезпечує стійкість до оклюзій та текстурно-бідних областей. Нові стратегії збільшення даних. Застосовуються специфічні методи доповнення, які підвищують точність роботи з неламбертовими поверхнями, такими як дзеркала чи прозорі матеріали. Оптичні ілюзії. Створено новий набір даних MonoTrap для оцінки роботи методу в умовах, де традиційні монокулярні моделі зазнають труднощів. Результати та переваги Stereo Anywhere демонструє видатну здатність до узагальнення в нульових-shot умовах, зокрема в ситуаціях. Дзеркальних поверхонь, де звичайні сенсори LiDAR або стерео-системи малоєфективні. Текстурно-бідних регіонів, де традиційні методи не можуть забезпечити точне зіставлення. Перспективних ілюзій, які зазвичай заплутують монокулярні моделі [14].

Для MOIUSOOI відповідає потребам у моделюванні та оптимізації інформаційних управляючих систем для реальних сценаріїв із високою складністю, таких як автономна навігація або розширена реальність.

Для ММІТДПДО може бути прикладом інтеграції.

Для нових ІСППРОПК може слугувати основою.

Neural Attention Memory Models. Метод Neural Attention Memory Models (NAMMs) представляє нову стратегію оптимізації трансформерів шляхом управління їх пам'яттю (KV-кешем). Метою є покращення ефективності трансформерів через відбір найважливіших контекстів у пам'яті моделі, що особливо корисно для задач із великими вікнами контексту. Запропонована модель навченої пам'яті визначає важливість токенів у KV-кеші, відкидаючи найменш значущі. Це враховує важливість токенів на рівні шарів і голів уваги, оптимізуючи роботу трансформера. Оптимізація пам'яті в NAMMs досягається завдяки використанню алгоритмів еволюції, що дозволяє уникати недоліків градієнтного спуску та ефективно управляти даними. Використання матриць уваги трансформера як єдиного входу забезпечує універсальність моделі для різних задач, заснованих на самоувазі. Навчені NAMMs знижують використання пам'яті до 75% без втрати продуктивності та підтримують zero-shot transfer на нові архітектури або домени [15].

Для MOIUSOOI використання NAMMs може значно оптимізувати процеси управління пам'яттю в інтелектуальних системах, знижуючи витрати на обчислення. Це особливо важливо для систем з великим обсягом даних, де необхідно зберігати лише найактуальнішу інформацію для прийняття рішень.

Для ММІТДПДО NAMMs здатні адаптивно виділяти найбільш релевантні характеристики динамічних об'єктів, забезпечуючи високу точність моделювання при зменшенні обсягу контексту. Це дозволяє зосередитись на ключових параметрах, мінімізуючи інформаційний шум.

Для ІСППРОПК завдяки здатності до "нульового переносу" NAMMs можуть бути застосовані для оптимізації процесів керування в різних доменах без необхідності додаткового навчання. Це підвищує ефективність систем підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності.

Висновки. Отримані результати підтверджують, що застосування методів обчислювального інтелекту в реальних системах дозволяє значно підвищити рівень адаптивності, точності та ефективності у вирішенні складних завдань. Результати досліджень показують, що інтеграція таких інноваційних технологій у різні сфери, зокрема в аналіз відео, синхронізацію даних та моделювання динамічних об'єктів, дає змогу не тільки покращити функціональність існуючих систем, але й відкрити нові можливості для оптимізації процесів управління. Це сприяє розробці більш ефективних рішень для автономних систем, робототехніки та

інших сфер, де високий рівень точності та швидкості є критичним. Аналіз застосування обчислювального інтелекту у відеоаналізі, синхронізації даних та моделюванні динамічних об'єктів демонструє значний потенціал для оптимізації реальних систем. Інтеграція методів глибокого навчання, синтетичних даних та аналізу рухів забезпечує високу точність та адаптивність систем до змінних умов. Це дозволяє ефективно підтримувати прийняття рішень у складних динамічних середовищах. Інтеграція таких технологій дає можливість значно зменшити обчислювальні витрати та підвищити швидкість виконання завдань у реальному часі, що є важливим аспектом для таких сфер як автономні транспортні засоби та робототехніка.

Використання методів HunyuanVideo та emg2pose дозволяє покращити точність аналізу та прогнозування, зокрема у сфері моніторингу та ідентифікації динамічних об'єктів, що є важливим для оптимізації процесів управління у реальному часі.

Методи StableAnimator і FlowNet здатні надати більш точну та стабільну анімацію та оцінку руху об'єктів, що важливо для моделювання та ідентифікації параметрів у складних системах.

Інтеграція методів YOLOv11, YOLO-NAS і SynCamMaster у системи обробки відео та даних дозволяє значно покращити точність виявлення та відновлення 3D-сцен, що може бути використано для автоматизації ідентифікації об'єктів і забезпечення ефективного керування.

Таким чином, подальший розвиток та впровадження інтегрованих підходів з використанням обчислювального інтелекту в різних сферах дозволяє підвищити ефективність і точність процесів управління, оптимізувати використання обчислювальних ресурсів та створити нові можливості для прийняття рішень у реальному часі.

Список літератури

1. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization—A Review. *Materials*, 2024. 17(14). 3521. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17143521> (дата звертання: 13.12.2024)
2. Нікуліна О. М., Северин В. П., Кондратов О. М., Рекова Н. Ю. Аналіз інформаційних технологій для дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 110–115.
3. HunyuanVideo: A Systematic Framework For Large Video. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.03603> (дата звертання: 13.12.2024)
4. emg2pose: A Large and Diverse Benchmark for Surface Electromyographic Hand Pose Estimation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02725> (дата звертання: 13.12.2024)
5. StableAnimator: High-Quality Identity-Preserving Human Image Animation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17697> (дата звертання: 13.12.2024)
6. DEYO: DETR with YOLO for End-to-End Object Detection. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.16370> (дата звертання: 13.12.2024)
7. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725> (дата звертання: 13.12.2024)

8. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. URL: <https://doi.org/10.3390/make5040083> (дата звертання: 13.12.2024)
9. SynCamMaster: Synchronizing Multi-Camera Video Generation from Diverse Viewpoints. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07760> (дата звертання: 13.12.2024)
10. FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.06852> (дата звертання: 13.12.2024)
11. FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.01925> (дата звертання: 13.12.2024)
12. Momentum-GS: Momentum Gaussian Self-Distillation for High-Quality Large Scene Reconstruction. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04887> (дата звертання: 13.12.2024)
13. Liger Kernel: Efficient Triton Kernels for LLM Training. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10989> (дата звертання: 13.12.2024)
14. Stereo Anywhere: Robust Zero-Shot Deep Stereo Matching Even Where Either Stereo or Mono Fail. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04472> (дата звертання: 13.12.2024)
15. An Evolved Universal Transformer Memory. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13166> (дата звертання: 13.12.2024)
16. Нікуліна О. М., Кондратов О. М. Методи дистанційної ідентифікації динамічних параметрів об'єкта. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023 р.* Харків, НТУ «ХПІ». 2023. С. 1047.
3. HunyuanVideo: A Systematic Framework For Large Video. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.03603> (accessed 13.12.2024)
4. emg2pose: A Large and Diverse Benchmark for Surface Electromyographic Hand Pose Estimation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02725> (accessed 13.12.2024)
5. StableAnimator: High-Quality Identity-Preserving Human Image Animation. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.17697> (accessed 13.12.2024)
6. DEYO: DETR with YOLO for End-to-End Object Detection. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.16370> (accessed 13.12.2024)
7. YOLOv11: An Overview of the Key Architectural Enhancements. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17725> (accessed 13.12.2024)
8. A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. URL: <https://doi.org/10.3390/make5040083> (accessed 13.12.2024)
9. SynCamMaster: Synchronizing Multi-Camera Video Generation from Diverse Viewpoints. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.07760> (accessed 13.12.2024)
10. FlowNet: Learning Optical Flow with Convolutional Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1504.06852> (accessed 13.12.2024)
11. FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.01925> (accessed 13.12.2024)
12. Momentum-GS: Momentum Gaussian Self-Distillation for High-Quality Large Scene Reconstruction. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04887> (accessed 13.12.2024)
13. Liger Kernel: Efficient Triton Kernels for LLM Training. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.10989> (accessed 13.12.2024)
14. Stereo Anywhere: Robust Zero-Shot Deep Stereo Matching Even Where Either Stereo or Mono Fail. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.04472> (accessed 13.12.2024)
15. An Evolved Universal Transformer Memory. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.13166> (accessed 13.12.2024)
16. Nikulina O. M., Kondratov O. M. Metody dystantsiynoi identyfikatsiyi dynamichnykh parametrov ob'yekta [Methods of remote identification of dynamic parameters of an object]. *Informatsiyini tekhnohohiyi: nauka, tekhnika, tekhnohohiya, osvita, zdorov'ya: Tezy dopovidey XXXI mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD-2023, 17-20 travnya 2023 r.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, p. 1047.

References (transliterated)

1. Krzywanski J., Sosnowski M., Grabowska K., Zylka A., Lasek L., Kijo-Kleczkowska A. Advanced Computational Methods for Modeling, Prediction and Optimization—A Review. *Materials*, 2024. 17(14). 3521. URL: <https://doi.org/10.3390/ma17143521> (accessed 13.12.2024)
2. Nikulina O. M., Severyn V. P., Kondratov O. M., Reкова N. Yu. Analiz informatsiynykh tekhnolohiy dlya dystantsiynoi identyfikatsiyi dynamichnykh ob'yektiv [Analysis of information technologies for remote identification of dynamic objects]. *Visnyk*

Надійшла (received) 03.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

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

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

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

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

A. M. КОПП, I. С. НЕСТЕРЕНКО

МОДЕЛЬ ВИБОРУ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Інтеграція інструментів штучного інтелекту (ШІ) у проекти з розробки програмного забезпечення значно підвищує ефективність виконання різних завдань протягом життєвого циклу розробки програмного забезпечення (SDLC). Інструменти на основі ШІ, вбудовані в інтегровані середовища розробки (IDE), підвищують продуктивність розробників і якість коду, а також сприяють кращій взаємодії між учасниками проекту та системами на основі ШІ. Основні напрямки досліджень у сфері інтеграції ШІ в процеси розробки програмного забезпечення включають адаптацію користувацьких інтерфейсів під конкретні завдання, підвищення довіри до систем на основі ШІ та покращення читабельності коду. ШІ покращує декілька етапів SDLC, зокрема автоматизовану генерацію коду, перегляд коду та прогнозування дефектів. Впровадження інструментів ШІ в IDE прискорює розробку, підвищує якість коду та зменшує кількість дефектів. Машинне навчання та обробка природної мови відіграють важливу роль у підвищенні якості програмного забезпечення завдяки класифікації вимог та прогнозуванню дефектів. Рішення на основі ШІ, такі як рекомендаційні системи та чат-боти, підтримують різні процеси розробки програмного забезпечення, включаючи збір вимог. Тому актуальним науково-практичним завданням є створення моделі для обґрунтованого вибору інструментів ШІ для підтримки процесів розробки програмного забезпечення з метою підвищення ефективності проектів. У цьому дослідженні запропоновано математичну модель, яка мінімізує витрати на використання інструментів ШІ, забезпечуючи при цьому дотримання мінімальних вимог, що впливають на ефективність проекту. Оптимізаційна модель враховує такі критерії, як вартість, можливості інтеграції, підтримки та функціональності, використовуючи нормалізовані оцінки на основі Gartner Peer Insights та інших відкритих джерел. Цільова функція мінімізує загальну вартість інструментів ШІ за умови дотримання обмежень, що забезпечують мінімально прийнятні оцінки. Розроблений підхід уможливує системний вибір інструментів ШІ, що підвищує ефективність проектів з розробки програмного забезпечення.

Ключові слова: інструменти штучного інтелекту, процеси розробки програмного забезпечення, проєкт з розробки програмного забезпечення, оптимізаційна модель.

A. M. KOPP, I. S. NESTERENKO

A MODEL FOR SELECTING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS TO SUPPORT SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESSES

Integrating artificial intelligence (AI) tools into software development projects significantly improves the efficiency of various tasks within the software development lifecycle (SDLC). AI-driven tools embedded in integrated development environments (IDEs) improve developer productivity and code quality, and facilitate better interaction between project participants and AI-based systems. The main research directions for integrating AI into software development processes include adapting user interfaces for specific tasks, increasing trust in AI-based systems, and improving code readability. AI enhances several SDLC stages, including automated code generation, code review and defect prediction. Implementing AI tools in IDEs accelerates development, improves code quality and reduces defects. Machine learning and natural language processing play a critical role in improving software quality through requirements classification and defect prediction. AI-based solutions, such as recommendation systems and chatbots, support various software development processes, including requirements gathering. Therefore, a relevant scientific and practical challenge is to create a model for the justified selection of AI tools to support software development processes in order to improve project efficiency. This study proposes a mathematical model that minimizes the cost of using AI tools, while ensuring compliance with minimum requirements that affect project efficiency. The optimization model takes into account criteria such as pricing, integration, support and functionality capabilities, using normalized evaluations based on Gartner Peer Insights and other open sources. The objective function minimizes the total cost of AI tools, subject to constraints that ensure minimum acceptable evaluation scores. The developed approach enables a systematic selection of AI tools, thus improving the efficiency of software development projects.

Keywords: artificial intelligence tools, software development processes, software development project, optimization model.

Вступ. Інтеграція різних інструментів штучного інтелекту (ШІ) в проекти з розробки програмного забезпечення (ПЗ) значно підвищує ефективність виконання різних завдань у рамках життєвого циклу розробки програмного забезпечення (SDLC – Software Development Lifecycle).

Так, наприклад, інструменти ШІ, інтегровані в середовища розробки ПЗ (IDE – Integrated Development Environment) дозволяють підвищити продуктивність розробників і якість коду, сприяючи кращій взаємодії залучених до проекту фахівців з інструментами на основі ШІ. Основні напрямки досліджень стосовно інтеграції ШІ в процеси розробки ПЗ включають розробку користувацьких інтерфейсів, пристосованих до виконання конкретних завдань, зміцнення довіри до ШІ-орієнтованих систем та покращення читабельності програмного коду [1].

Застосування ШІ дозволяє удосконалити різні

етапи SDLC, включаючи автоматизовану генерацію програмного коду, перегляд програмного коду (так зване «code review») та передбачення виникнення помилок. Впровадження до IDE інструментів на основі ШІ призводить до прискорення процесів розробки, покращення якості коду та запобігання виникненню помилок [2].

Машинне навчання (ML – Machine Learning) та обробка природної мови (NLP – Natural Language Processing) відіграють ключову роль у підвищенні якості ПЗ, наприклад, завдяки класифікації вимог або прогнозування виникнення дефектів. Таким чином, широке застосування відповідних інструментів ML та NLP на всіх етапах розробки ПЗ дозволяє підвищити ефективність виконання технічних завдань членами проектною командою [3].

Різноманітні рішення на основі ШІ, такі як рекомендаційні системи та чат-боти, забезпечують

підтримку різних процесів розробки ПЗ, таких як збір вимог і багатьох інших. Ці інструменти дозволяють підвищити ефективність праці як розробників ПЗ, так і інших фахівців, спрощуючи завдання завдяки наданню інтелектуальної підтримки своїм користувачам [4].

Отже, актуальною науково-практичною задачею є створення моделі для забезпечення обґрунтованого вибору ШІ-засобів підтримки процесів розробки ПЗ, що дозволить підвищити ефективність проєктів з розробки ПЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно дослідження [5], використання інструментів на основі ШІ, таких як GitHub Copilot, демонструє підвищення продуктивності на 21-28% при виконанні завдань в проєктах з розробки ПЗ. Автори відмічають, що це стає особливо корисним для розробників-початківців, завдяки скороченню часу на написання програмного коду та підвищенню задоволеності роботою [5].

Систематичний огляд досліджень [2] в сфері інтеграції ШІ в інженерію ПЗ підкреслює використання машинного навчання та глибокого навчання на етапах розробки та тестування ПЗ, що дозволяє підвищити якість ПЗ завдяки прогнозуванню виникнення помилок та рекомендаціям щодо покращення якості програмного коду [2].

У літературних джерелах, присвячених досвіду у сфері інтеграції ШІ до IDE, наприклад у [1], підкреслюється важливість розробки користувацьких інтерфейсів, які сприяють довірі розробників та покращують читабельність програмного коду, що має вирішальне значення для ефективної співпраці між розробниками та ШІ-засобами [1]. В іншій оглядовій статті [6] здійснюється аналіз 44 досліджень, які висвітлюють роль застосування інструментів на основі ШІ в підвищенні ефективності виконання фаз Agile-проєктів, пов'язаних з оцінками ризиків у плануванні, оцінками зусиль, розподілом завдань, комунікацією в команді, розв'язанням технічних задач та іншими аспектами.

У роботі [7] увага приділяється дослідженню впливу генеративного ШІ на ефективність розробки ПЗ, результати застосування якого демонструють скорочення часу на створення програмного коду на 45%, покращення тестового покриття програмного коду на 60% і зменшення кількості проблем після розгортання ПЗ на 30%, що підкреслює важливість застосування інструментів на основі ШІ для підвищення ефективності виконання завдань у проєктах з розробки ПЗ. Інше дослідження [8] розглядає застосування методів машинного навчання для розподілу ресурсів і планування, що демонструє значне підвищення ефективності проєктів з розробки ПЗ, в тому числі – підвищення ефективності розподілу ресурсів на 37% і збільшення частки вчасно виконаних проєктів на 25%.

У статті [9] також відзначається роль ШІ в підвищенні ефективності управління проєктами, зокрема за допомогою таких методів, як лінійне програмування, генетичні алгоритми та нейронні

мережі, які дозволяють удосконалити процеси розподілу ресурсів, планування та прийняття рішень, що в кінцевому підсумку дозволить покращити результати проєктів з розробки ПЗ та задоволеність стейкхолдерів.

Стаття [10], присвячена ролі ШІ в удосконаленні Agile-методологій, розглядає застосування ШІ-засобів для підвищення якості ПЗ. В роботі [10] відмічається важливість вибору відповідних ШІ-асистентів для виконання конкретних завдань з метою удосконалення процесів розробки ПЗ. У роботі [11] розглядаються методи ШІ, такі як нейронні мережі, нечітка логіка та інтелектуальний аналіз даних, відмічається потенціал їх застосування для підвищення ефективності розробки ПЗ на різних етапах проєкту, зокрема, підкреслюється важливість використання інструментів ШІ, спеціально адаптованих до конкретних завдань.

Дослідження [12] присвячене інтелектуальним інструментам розробки ПЗ, які дозволяють підвищити ефективність за рахунок автоматизації генерації програмного коду на основі високорівневих описів бізнес-процесів, дозволяючи інженерам і замовникам зосередитися на вимогах, а не на програмуванні. Також у статті [13] розглядається інтеграція генеративного ШІ в гнучку розробку ПЗ – висвітлюється застосування ШІ в завданнях генерації програмного коду, автоматизованому тестуванні та пошуку дефектів, що дозволяє підвищити продуктивність і прискорити цикли доставки ПЗ, ефективно вирішуючи загальні проблеми управління проєктами.

Ще в одній статті [14] розглядається застосування методів ШІ для підвищення ефективності розробки ПЗ протягом усього життєвого циклу розробки ПЗ. При цьому, акцент робиться на автоматизацію таких завдань, як інженерія вимог, генерація програмного коду, проєктування ПЗ, тестування ПЗ, покращуючи таким чином результати проєкту та скорочуючи час на його реалізацію [14].

Мета дослідження. Підвищення ефективності проєктів з розробки ПЗ за рахунок обґрунтованого вибору ШІ-засобів підтримки процесів розробки ПЗ і подальшого їх впровадження.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення обґрунтованого вибору ШІ-засобів підтримки процесів розробки ПЗ, пропонується математична модель, яка передбачає мінімізацію вартості використання ШІ-інструментів при забезпеченні мінімальних вимог за аспектами, які впливають на ефективність проєктів з розробки ПЗ.

Нехай визначено множину завдань проєкту з розробки ПЗ $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ та множину доступних ШІ-інструментів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$.

Визначимо бінарну змінну x_{ij} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a_j \text{ обрано для завдання } t_i; \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (1)$$

Для кожного інструменту визначаються наступні оцінки, згідно методології Gartner Peer Insights [15]:

- $e_j, j = \overline{1, m}$ – оцінка інструмента a_j за ціновою політикою та взаємодією з клієнтами (Evaluation & Contracting);
- $d_j, j = \overline{1, m}$ – оцінка інструмента a_j за рівнем інтеграції та розгортання (Integration & Deployment);
- $s_j, j = \overline{1, m}$ – оцінка інструмента a_j за рівнем обслуговування та підтримки (Service & Support);
- $p_j, j = \overline{1, m}$ – оцінка інструмента a_j за функціональними можливостями (Product Capabilities);
- $c_j, j = \overline{1, m}$ – вартість використання інструмента a_j .

Оскільки за методологією Gartner Peer Insights оцінювання інструментів здійснюється за шкалою 1–5, пропонується провести нормалізацію за допомогою Min-Max методу [16] для приведення значень $e_j, d_j, s_j, p_j, j = \overline{1, m}$ до діапазону $[0, 1]$:

$$e_j^* = \frac{e_j - \min_{j=1, m} e_j}{\max_{j=1, m} e_j - \min_{j=1, m} e_j} \quad (2)$$

$$d_j^* = \frac{d_j - \min_{j=1, m} d_j}{\max_{j=1, m} d_j - \min_{j=1, m} d_j} \quad (3)$$

$$s_j^* = \frac{s_j - \min_{j=1, m} s_j}{\max_{j=1, m} s_j - \min_{j=1, m} s_j} \quad (4)$$

$$p_j^* = \frac{p_j - \min_{j=1, m} p_j}{\max_{j=1, m} p_j - \min_{j=1, m} p_j} \quad (5)$$

Для нормалізації значень вартості $c_j, j = \overline{1, m}$ пропонується застосувати обернену нормалізацію, оскільки менші значення вартості в умовах вибору ШІ-інструментів для виконання завдань проекту з розробки ПЗ є переважними:

$$c_j^* = \frac{\max_{j=1, m} c_j - c_j}{\max_{j=1, m} c_j - \min_{j=1, m} c_j} \quad (6)$$

Таким чином, після нормалізації всі оцінки ШІ-інструментів $a_j, j = \overline{1, m}$ за означеними критеріями (2)–(6) будуть приведені до однакового масштабу в діапазоні $[0, 1]$, що дозволить використовувати їх у оптимізаційній моделі вибору ШІ-засобів підтримки процесів розробки ПЗ.

Цільова функція запропонованої оптимізаційної моделі передбачає мінімізацію загальної вартості C використання ШІ-засобів для виконання завдань проекту з розробки ПЗ, що визначається через суму добутків нормалізованих коефіцієнтів вартості c_j^* та бінарних змінних x_{ij} :

$$\min C, C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_j^* x_{ij}. \quad (7)$$

У вигляді обмежень оптимізаційної задачі представимо мінімальні вимоги до оцінок ШІ-інструментів згідно методології Gartner Peer Insights,

виражені через нормалізовані коефіцієнти $e_j^*, d_j^*, s_j^*, p_j^*, j = \overline{1, m}$, які повинні бути виконані за кожним аспектом:

$$E \geq \hat{E}, E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m e_j^* x_{ij}, \quad (8)$$

де E – загальна оцінка набору ШІ-засобів за ціновою політикою та взаємодією з клієнтами (Evaluation & Contracting);

\hat{E} – мінімальне прийнятне значення оцінки набору ШІ-засобів за ціновою політикою та взаємодією з клієнтами (Evaluation & Contracting);

$$D \geq \hat{D}, D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_j^* x_{ij}, \quad (9)$$

де D – загальна оцінка набору ШІ-засобів за рівнем інтеграції та розгортання (Integration & Deployment);

\hat{D} – мінімальне прийнятне значення оцінки набору ШІ-засобів за рівнем інтеграції та розгортання (Integration & Deployment);

$$S \geq \hat{S}, S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_j^* x_{ij}, \quad (10)$$

де S – загальна оцінка набору ШІ-засобів рівнем обслуговування та підтримки (Service & Support);

\hat{S} – мінімальне прийнятне значення оцінки набору ШІ-засобів рівнем обслуговування та підтримки (Service & Support);

$$P \geq \hat{P}, P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_j^* x_{ij}, \quad (11)$$

де P – загальна оцінка набору ШІ-засобів за функціональними можливостями (Product Capabilities);

\hat{P} – мінімальне прийнятне значення оцінки набору ШІ-засобів за функціональними можливостями (Product Capabilities).

Додатково накладається обмеження з вибору для кожного завдання проекту з розробки ПЗ лише одного ШІ-інструменту:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Крім того, змінні оптимізації $x_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ повинні бути булевими:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Запропонована математична модель являє собою задачу булевої оптимізації, яка дозволяє сформулювати набір ШІ-інструментів для виконання набору завдань проекту з розробки ПЗ з урахуванням аспектів якості (згідно методології Gartner Peer Insights) та вартості. Основною метою даної моделі є мінімізація загальних витрат на використання ШІ-засобів при одночасному забезпеченні виконання мінімальних оцінок цінової політики та взаємодії з клієнтами, рівня інтеграції та розгортання, обслуговування та підтримки, а також оцінок функціональних можливостей. Нормалізація відповідних коефіцієнтів надає змогу уникнути впливу різних масштабів величин (наприклад, оцінок від 1 до 5 та вартості використання ШІ-засобів у

6. Lumbanraja H. L., Raharjo T., Fitriani A. N. Artificial Intelligence Implementation in Agile Project Management Addressing Challenges and Maximizing Impact. *The Indonesian Journal of Computer Science*, Vol. 3, No. 4, 2024. Available at : <https://www.doi.org/10.33022/ijcs.v13i4.4155>. (accessed 12.12.2024).
7. Modi M. D. B. Transforming Software Development Through Generative AI : A Systematic Analysis of Automated Development Practices. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, Vol. 10, No. 6. Available at : <https://www.doi.org/10.32628/cseit24106197>. (accessed 14.12.2024).
8. Hossain M. Z., Hasan L., Dewan M. A., Monira N. A. The impact of artificial intelligence on project management efficiency. *International Journal of Management Information Systems and Data Science*, Vol. 1, No. 05, 2024. Available at : <https://www.doi.org/10.62304/ijmisds.v1i05.211>. (accessed 15.12.2024).
9. Sravanthi J., Sobti R., Semwal A., Shrahan M., Al-Hilali A. A., Alazzam M. B. AI-Assisted Resource Allocation in Project Management. *IEEE Xplore*, 2023. Available at : <https://www.doi.org/10.1109/icacite57410.2023.10182760>. (accessed 15.12.2024).
10. Narasimha M. M. Literature Review AI-Powered Agile: Reimagining Software Development through Automation, XAI, and Continuous Learning. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, Vol. 11, No. 12, 2023. Available at : <https://www.doi.org/10.56025/ijaresm.2023.1112231949>. (accessed 15.12.2024).
11. Meziane F., Vadera S. Artificial Intelligence in Software Engineering: Current Developments and Future Prospects. *Machine Learning: Concepts, Methodologies, Tools and Applications*, 2012. Available at : <https://www.doi.org/10.4018/978-1-60960-818-7.CH504>. (accessed 15.12.2024).
12. Palacios-González E., Fernández-Fernández H., García-Díaz V., García-Bustelo B. C. P., Lovelle J. M. C. A review of Intelligent Software Development Tools. *Proceedings of the 2008 International Conference on Artificial Intelligence*, 2008. Available at : <https://dblp.uni-trier.de/db/conf/icaai/icaai2008.html#Palacios-GonzalezFGGL08>. (accessed 16.12.2024).
13. Bahi A., Gharib J., Gahi Y. Integrating Generative AI for Advancing Agile Software Development and Mitigating Project Management Challenges. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 15, No. 3, 2024. Available at : <https://www.doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150306>. (accessed 16.12.2024).
14. Sorte B. W., Joshi P. P., Jagtap V. Use of Artificial Intelligence in Software Development Life Cycle: A state of the Art Review. *International Journal of Advanced Engineering and Global Technology*, Vol. 03, No. 03, 2015. Available at : https://www.researchgate.net/profile/Vandana_Jagtap/publication/274247843_Use_of_Artificial_Intelligence_in_Software_Development_Life_Cycle_A_state_of_the_Art_Review/links/551925a20cf273292e70a6da.pdf. (accessed 17.12.2024).
15. *Gartner Peer Insights*. Available at : <https://www.gartner.com/peer-insights/home>. (accessed 17.12.2024).
16. Patro S. G. P., Sahu K. K. Normalization: A Preprocessing Stage. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, No. 3, 2015. Available at : <http://dx.doi.org/10.17148/IARJSET.2015.2305>. (accessed 17.12.2024).

Надійшло (received) 11.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

Нестеренко Іван Сергійович (Nesterenko Ivan) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; e-mail: ivan.s.nesterenko@cs.khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5842-5426>.

А. О. ЛИСЕНКО, М. С. ТВЕРДА

РОЗРОБКА ВЕБ-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ДОКУМЕНТАЦІЇ ДЛЯ ТЕСТУВАЛЬНИКІВ ТА ОЦІНКА ЙОГО ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕСТУВАННЯ В ІТ-ПРОЕКТАХ

Розробка веб-застосунку для створення документації для тестувальників є важливим аспектом підвищення ефективності процесу тестування в ІТ-проектах. Сучасні ІТ-проекти стають дедалі складнішими, що зумовлює необхідність впровадження інструментів, які можуть забезпечити чітке й структуроване створення, підтримку та оновлення тестової документації. Така документація є невід'ємною частиною процесу забезпечення якості та відіграє ключову роль у взаємодії між учасниками команди. Метою статті є не лише опис функціональних можливостей розробленого веб-застосунку, але й оцінка його реального впливу на ефективність тестування в ІТ-проектах. Створення спеціалізованого веб-застосунку дозволяє автоматизувати рутинні процеси, зокрема документування тестових сценаріїв, звітів про помилки та результатів тестування. Це знижує час, що витрачається на ручне виконання цих завдань, і значно зменшує ризик людських помилок. Крім того, автоматизація сприяє підвищенню точності та ефективності тестування, оскільки дозволяє тестувальникам зосередитися на основних аспектах їхньої роботи замість механічних завдань. Розроблений веб-застосунок інтегрує функції управління проектами, що дає змогу ефективніше планувати, розподіляти та контролювати тестові завдання. Наприклад, функціональність для створення інтерактивних тестових сценаріїв, управління пріоритетами тестів і моніторингу прогресу дозволяє командам адаптуватися до змін у проекті в реальному часі. Це, своєю чергою, сприяє покращенню комунікації між тестувальниками, розробниками та іншими зацікавленими сторонами, забезпечуючи прозорість процесу тестування. У статті також розглядається вплив впровадження веб-застосунку на продуктивність команд. Було проведено порівняльний аналіз між часом, необхідним для ручного створення документації, і часом, який потрібен для створення тих самих документів за допомогою автоматизованого інструменту. Результати показали, що автоматизація дозволяє значно зменшити затрати часу на документування, одночасно підвищуючи якість і повноту створених звітів. Додатково обговорюються перспективи подальшого вдосконалення веб-застосунку та його інтеграції з іншими інструментами для управління ІТ-проектами.

Ключові слова: веб-застосунок, тестування, документація для тестувальників, оптимізація процесу тестування, зменшення часу на документування, ефективність тестування, ІТ-проект.

A. O. LYSENKO, M. S. TVERDA

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR CREATING DOCUMENTATION FOR TESTERS AND EVALUATION OF ITS IMPACT ON THE EFFECTIVENESS OF TESTING IN IT PROJECTS

The development of a web application for creating documentation for testers is a crucial aspect of improving the efficiency of the testing process in IT projects. Modern IT projects are becoming increasingly complex, necessitating tools that can ensure a clear and structured approach to creating, maintaining, and updating test documentation. This documentation is an integral part of the quality assurance process and plays a key role in the interaction between team members. The aim of this paper is not only to describe the functional capabilities of the web application but also to assess its real impact on testing efficiency in IT projects. The creation of a specialized web application enables the automation of routine processes, such as documenting test scenarios, bug reports, and testing outcomes. This reduces the time spent on manual execution of these tasks and significantly minimizes the risk of human error. Furthermore, automation enhances the accuracy and efficiency of testing by allowing testers to focus on critical aspects of their work instead of mechanical tasks. The developed web application integrates project management functionalities, allowing for more efficient planning, distribution, and control of testing tasks. For example, features such as creating interactive test scenarios, managing test priorities, and monitoring progress enable teams to adapt to project changes in real-time. This, in turn, improves communication between testers, developers, and other stakeholders, ensuring transparency in the testing process. The paper also examines the impact of implementing the web application on team productivity. A comparative analysis was conducted between the time required for manual documentation and the time needed to create the same documents using the automated tool. The results showed that automation significantly reduces the time spent on documentation while simultaneously improving the quality and completeness of the generated reports. Additionally, the prospects for further improvement of the web application and its integration with other IT project management tools are discussed.

Keywords: web application, testing, documentation for testers, optimizing the testing process, reducing the time for documentation, testing efficiency, IT project.

Вступ. Вступ. Стрімкий розвиток інформаційних технологій та зростання масштабів сучасних проектів висувають дедалі вищі вимоги до процесів тестування програмного забезпечення. Від ефективності цього процесу значною мірою залежить якість кінцевого продукту, дотримання термінів випуску та рівень задоволеності клієнтів. Однак традиційні підходи до створення та ведення документації для тестувальників нерідко не відповідають сучасним викликам, що спричиняє затримки, підвищення кількості помилок і перевитрати ресурсів. У цьому контексті впровадження спеціалізованих веб-застосунків для оперативного створення, оновлення та управління тестовою документацією може стати вирішальним кроком для підвищення ефективності тестування та оптимізації процесів забезпечення якості.

Актуальність роботи. Тестування програмного забезпечення відіграє критично важливу роль у виявленні дефектів на ранніх етапах розробки, забезпечуючи стабільність та якість кінцевого продукту. Це є одним із ключових етапів життєвого циклу будь-якого ІТ-проекту. Із зростанням складності сучасних проектів і скороченням термінів розробки зростає потреба у швидкому та ефективному створенні й веденні тестової документації. Використання веб-застосунків із вбудованими шаблонами для часткової автоматизації цього процесу дозволяє не лише оптимізувати роботу тестувальників, але й значно скоротити час, витрачений на рутинні завдання. Це сприяє підвищенню продуктивності команд, які займаються забезпеченням якості, і дозволяє їм зосередитися на складніших та творчих аспектах тестування.

©, А. О. Лисенко, М. С. Тверда, 2024

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз розробленого веб-застосунку для створення документації для тестувальників, а також оцінка його впливу на ефективність тестування в ІТ-проектах. Особливу увагу приділено визначенню можливостей скорочення часу, витрат та зусиль, необхідних для написання й підтримки тестової документації. У роботі також розглядаються аспекти інтеграції веб-застосунку в існуючі процеси тестування, його здатність підвищувати продуктивність команди та зменшувати вплив людського фактору на якість документації.

Вирішення задачі. Розробка веб-застосунку для створення документації для тестувальників передбачає часткову автоматизацію та спрощення процесів документування, що спрямовані на підвищення точності й ефективності тестування. Автоматизація процесів створення, оновлення та управління тестовою документацією залишається актуальною темою досліджень і практичного впровадження впродовж багатьох років [1-6].

Тестування є одним із найважливіших етапів забезпечення якості програмного забезпечення, адже саме воно дозволяє виявити й усунути дефекти до того, як продукт потрапить у середовище «продакшн». Помилки, виявлені на ранніх етапах розробки, наприклад на етапі специфікації, є відносно недорогими для виправлення. Натомість помилки, що залишаються невиправленими до пізніх етапів розробки або навіть «продакшн», можуть значно підвищити витрати, як з точки зору часу, так і ресурсів.

Дослідження Г. Брайніка [8] підтверджують, що використання автоматизованих інструментів у процесах документування та тестування сприяє зменшенню ризику виникнення помилок, підвищенню доступності й зручності роботи з документацією. Такі інструменти допомагають запобігти людським помилкам, забезпечують оперативне оновлення тестової документації та підтримують її актуальність, що має особливе значення для тестувальників.

Крім того, можливість групування та структурованого представлення документації дозволяє тестувальникам швидше виявляти потенційно пов'язані помилки, запобігаючи їх накопиченню на наступних етапах розробки. Це не лише покращує процес тестування, але й знижує витрати, пов'язані з виправленням дефектів, та підвищує загальну якість програмного забезпечення.

Дослідження Г. А. Ді Лукка та його колег [9] демонструють, що для ефективного тестування веб-застосунків необхідно враховувати особливості взаємодії з браузером, клієнтськими технологіями та їхню поведінку в різних умовах. Недостатньо ретельне тестування може залишити серйозні помилки непоміченими, що, своєю чергою, може спричинити збої у роботі веб-застосунків, зниження продуктивності та негативний користувацький досвід.

М. Н. Алаффі [10] наголошує на важливості наявності чіткої навігаційної моделі веб-застосунків

як основи для створення тестових сценаріїв. Така модель дозволяє тестувальникам краще структурувати тестові кейси, враховуючи логіку та взаємодію елементів користувацького інтерфейсу. Впровадження цих підходів сприяє підвищенню якості тестування, забезпечуючи покриття різних сценаріїв використання веб-застосунку, включаючи крайні випадки та нестандартні умови.

Без комплексної моделі тестування неповна або неякісна документація може залишити важливі аспекти програми неперевіреними, що значно підвищує ризик випуску веб-продукту з критичними помилками. Щоб уникнути дорогих виправлень на пізніх стадіях розробки або після випуску продукту, необхідно забезпечити ефективне та всебічне тестування, яке базується на добре організованій та актуальній документації.

Для цього було поставлено завдання створити інструмент, який частково автоматизує процеси написання та оновлення тестової документації, забезпечуючи її швидке й зручне редагування. У рамках реалізації цього завдання було проведено аналіз потреб користувачів, а також досліджено сучасні підходи до тестування програмного забезпечення та написання тестової документації.

Розроблений веб-застосунок відповідає сучасним вимогам до програмного забезпечення та пропонує систему управління документацією, яка автоматизує основні процеси роботи з документами, зокрема створення, редагування, видалення та перегляд. Інтеграція з шаблонами дозволяє стандартизувати документи та прискорити їх створення (рис. 1). Такий підхід забезпечує зручність використання та підвищує ефективність роботи тестувальників.

Веб-застосунок включає розширений функціонал управління шаблонами, що дозволяє додавати, редагувати, видалити шаблони, а також налаштовувати доступ для окремих користувачів і команд. Крім того, система підтримує повний цикл роботи з користувачами, включаючи їхнє додавання, видалення, зміну ролей і організацію команд для ефективного розподілу завдань.

Система забезпечує надійні механізми авторизації, реєстрації та безпечного виходу користувачів, що гарантує захист даних. Важливим доповненням є інструменти глобального пошуку, які дозволяють швидко знаходити необхідну інформацію, оптимізуючи робочі процеси. Це рішення підвищує ефективність колаборації між учасниками команди та забезпечує високий рівень безпеки даних.

Хоча веб-застосунок орієнтований на використання в ІТ-сфері, його функціонал робить його універсальним інструментом, придатним для будь-якої галузі, де потрібно створювати, організовувати та управляти документацією. Основними користувачами є спеціалісти з тестування програмного забезпечення, розробники, керівники проєктів, а також вся ІТ-команда. Завдяки своїй гнучкості, застосунок може бути адаптований під потреби різних команд та організацій.

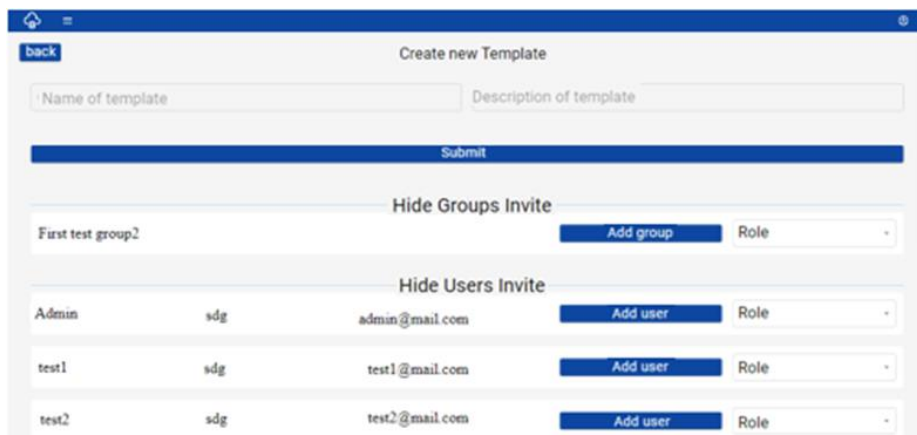


Рис. 1. Форма створення шаблону в веб-застосунку «TestDoc»

Застосунок підтримує три рівні ролей: адміністратор, редактор і переглядач. Адміністратор має розширені повноваження, включаючи управління користувачами (додавання, блокування, розблокування), а також повний доступ до створення, редагування та видалення документів для всіх команд. Редактор отримує права на редагування лише тих документів, до яких йому надано доступ, тоді як переглядач обмежується можливістю перегляду документів у межах своєї зони доступу. Такий розподіл ролей забезпечує чіткий контроль доступу, підвищує безпеку даних і сприяє ефективному управлінню процесами в команді.

Одним із ключових аспектів ефективного тестування програмного забезпечення є оптимізація процесу створення тестової документації. У традиційному підході, коли документи створюються вручну, тестувальники витрачають значну кількість часу на повторювані рутинні завдання. Це не лише знижує продуктивність команди, а й збільшує витрати компанії.

Результати дослідження показують, що впровадження часткової автоматизації написання документації дозволяє суттєво скоротити витрати часу на ці завдання. Було виконано розрахунок економії часу для команди з трьох тестувальників, який демонструє річний обсяг заощаджених годин. Крім того, було оцінено потенційну фінансову вигоду для компанії, яка виникає внаслідок оптимізації робочих процесів і підвищення загальної ефективності команди. Ці результати підтверджують економічну доцільність

впровадження автоматизованих інструментів у процеси створення тестової документації.

У рамках дослідження було проведено два експерименти для порівняння часу, необхідного для написання тестової документації вручну та з використанням розробленого веб-застосунку «TestDoc».

Перший експеримент полягав у створенні тестової документації з нуля у форматі Word-файлу. Було зафіксовано час, витрачений на написання документів вручну. Другий експеримент передбачав створення аналогічної документації за допомогою веб-застосунку з використанням заздалегідь підготовлених шаблонів. Це забезпечувало структурованість, стандартизацію й оптимізацію процесу створення документів.

Для об'єктивного порівняння в обох експериментах використовували однакові дані: 10 схожих багів і 10 тестових випадків, які потребували написання баг-репортів і тест-кейсів. Обсяг і зміст даних залишалися незмінними, що гарантувало точність та достовірність результатів.

Результати експериментів було представлено у вигляді порівняльної таблиці середнього часу написання баг-репорту (рис. 2). Згідно з отриманими даними, середній час написання одного баг-репорту вручну становив 16,61 хвилини, тоді як використання веб-застосунку скоротило цей час до 12,14 хвилини. Таким чином, завдяки «TestDoc» вдалося заощадити в середньому 4 хвилини 47 секунд на кожному баг-репорті.

	Вручну	З застосунком
Баг репорт 1	15,4	11,3
Баг репорт 2	16,5	12,1
Баг репорт 3	14,5	12,2
Баг репорт 4	17,5	12,2
Баг репорт 5	18	13,1
Баг репорт 6	17	12,5
Баг репорт 7	18,2	12,5
Баг репорт 8	14,3	11
Баг репорт 9	16,5	12,2
Баг репорт 10	18,2	12,3
Середнє значення	16,61	12,14

Рис. 2. Порівняльна таблиця середнього часу написання баг-репортів

Також було представлено порівняльну таблицю середнього часу написання тест-кейсу (рис. 3). Згідно з отриманими результатами, середній час написання одного тест-кейсу вручну перевищував час, необхідний для створення аналогічного тест-кейсу за

допомогою веб-застосунку, на 5 хвилин 16 секунд. Це демонструє, що використання «TestDoc» дозволяє значно скоротити час на виконання рутинних завдань, сприяючи підвищенню продуктивності тестувальників і зменшенню витрат часу на створення документації.

	Вручну	З застосунком
Тест-кейс 1	22,5	16,4
Тест-кейс 2	20,4	15,5
Тест-кейс 3	24,5	19,5
Тест-кейс 4	19,4	15,5
Тест-кейс 5	22,4	17,4
Тест-кейс 6	22,3	18,2
Тест-кейс 7	21,5	17,4
Тест-кейс 8	20,5	15,4
Тест-кейс 9	22,4	16,2
Тест-кейс 10	22,5	15,3
Середнє значення	21,84	16,68

Рис. 3. Порівняльна таблиця середнього часу написання тест-кейсів

На основі отриманих даних було проведено розрахунок потенційної економії часу та коштів для команди з трьох тестувальників. Щоденна економія часу для одного тестувальника на написання баг-репортів становить 13 хвилин 41 секунду, а на написання тест-кейсів – 10 хвилин 32 секунди. Загалом це дозволяє заощадити 24 хвилини 13 секунд на день для одного тестувальника. У місячному вимірі, за умови 22 робочих днів, економія часу для одного тестувальника становить 64,35 години. Для команди з трьох тестувальників цей показник досягає 193,05 години на місяць.

Враховуючи середню зарплату тестувальника у 25 000 грн і погодинну ставку 156,25 грн, економія коштів для команди з трьох тестувальників становить приблизно 30 164 грн на місяць. Ці результати підкреслюють значну фінансову вигоду від використання автоматизованих інструментів для створення тестової документації.

Висновок. Розроблений веб-застосунок «TestDoc» продемонстрував високу ефективність у скороченні часу, необхідного для створення та ведення тестової документації. Це дозволяє тестувальникам зосередитися на вирішенні критичних завдань, що сприяє підвищенню загальної продуктивності команди. Оптимізація процесів документування також зменшує кількість помилок, пов'язаних із ручним введенням даних, що позитивно впливає на якість тестування.

Заощаджений час і ресурси еквівалентні суттєвому скороченню витрат, що підтверджує економічну доцільність впровадження автоматизованих інструментів у процеси тестування. Крім того, застосунок має значний потенціал для подальшого вдосконалення, зокрема шляхом інтеграції з іншими популярними інструментами управління тестуванням і проектами. Це зробить його ще більш зручним, функціональним та корисним для

користувачів, сприяючи ширшому впровадженню в ІТ-компаніях.

Список літератури

1. Szatmári A., Gergely T., Beszédés Á. ISTQB-based Software Testing Education: Advantages and Challenges. 2023 *IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*, м. Dublin, Ireland., 16–20 квіт. 2023 р. 2023. Doi: 10.1109/icstw58534.2023.00072.
2. Badgett T., Myers G. J., Sandler C. *Art of Software Testing*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011. 256 p.
3. Barker T. *Perspectives on Software Documentation: Inquiries and Innovations* / ed. by T. T. Barker. Routledge, 2020. Doi: 10.4324/9781315223919.
4. Committee I. C. S. S. & S. E. S. IEEE standard for software and system test documentation. New York, NY: Institute for Electrical and Electronics Engineers, 2008. 118 p.
5. Blokdyk G. *Software test documentation: Standard Requirements*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018. 134 p.
6. Shi Y., Peng Z., Hong, L., Yu Q. SoC-constrained team formation with self-organizing mechanism in social networks. *Knowledge-Based Systems*. 2017, vol. 138, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.knosys.2017.09.018.
7. U. S. General Accounting Office Staff. *Greater Emphasis on Testing Needed to Make Computer Software More Reliable and Less Costly*. Independently Published, 2019.
8. Brajnik G. *Using Automatic Tools in Accessibility and Usability Assurance Processes. User-Centered Interaction Paradigms for Universal Access in the Information Society*. Berlin, Heidelberg, 2004. P. 219–234. Doi: 10.1007/978-3-540-30111-0_18.
9. Di Lucca G. A. *Testing Web-based applications: the state of the art and future trends. Proceedings of the 29th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2005)*, Edinburgh, 26–28 July 2005. 2005. Doi: 10.1109/compsac.2005.95.
10. Alalfi M. H., Cordy J. R., Dean T. R. *A Survey of Analysis Models and Methods in Website Verification and Testing. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg. P. 306–311. Doi: 10.1007/978-3-540-73597-7_25.

References (transliterated)

1. Szatmári A., Gergely T., Beszédés Á. ISTQB-based Software Testing Education: Advantages and Challenges. 2023 *IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*, м. Dublin, Ireland., 16–20 квіт. 2023 р. 2023. Doi: 10.1109/icstw58534.2023.00072.
2. Badgett T., Myers G. J., Sandler C. *Art of Software Testing*. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011. 256 p.

3. Barker T. Perspectives on Software Documentation: Inquiries and Innovations / ed. by T. T. Barker. Routledge, 2020. Doi: 10.4324/9781315223919.
4. Committee I. C. S. S. & S. E. S. IEEE standard for software and system test documentation. New York, NY : Institute for Electrical and Electronics Engineers, 2008. 118 p.
5. Blokdyk G. Software test documentation: Standard Requirements. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2018. 134 p.
6. Shi Y., Peng Z., Hong, L., Yu Q. SoC-constrained team formation with self-organizing mechanism in social networks. *Knowledge-Based Systems*. 2017, vol. 138, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.knosys.2017.09.018.
7. U. S. General Accounting Office Staff. Greater Emphasis on Testing Needed to Make Computer Software More Reliable and Less Costly. Independently Published, 2019.
8. Brajnik G. Using Automatic Tools in Accessibility and Usability Assurance Processes. *User-Centered Interaction Paradigms for Universal Access in the Information Society*. Berlin, Heidelberg, 2004. P. 219–234. Doi: 10.1007/978-3-540-30111-0_18.
9. Di Lucca G. A. Testing Web-based applications: the state of the art and future trends. *Proceedings of the 29th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2005)*, Edinburgh, 26–28 July 2005. 2005. Doi: 10.1109/compsac.2005.95.
10. Alalfi M. H., Cordy J. R., Dean T. R. A Survey of Analysis Models and Methods in Website Verification and Testing. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg. P. 306–311. Doi: 10.1007/978-3-540-73597-7_25.

Надійшла (received) 18.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

Тверда Марія Сергіївна (Tverda Mariia) – студентка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: mariya2002tv@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2701-7050>

О. В. ЛОБАЧ, А. І. САРЖЕВСЬКИЙ

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ В ЛОКОМОТИВНОМУ ДЕПО ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ

Автоматизація діяльності підприємств є одним із ключових напрямів розвитку інформаційних технологій у сучасних умовах. Проте низка галузей, зокрема технічне обслуговування електропоїздів, досі використовує застарілі методи управління виробничими процесами. Це створює суттєві проблеми, оскільки дана галузь пов'язана з високим рівнем відповідальності та потенційними ризиками. Навіть незначна помилка може призвести до серйозних фінансових збитків або травмування персоналу. Одним з найбільших проблем залишається документообіг. У багатьох випадках передача важливої інформації здійснюється через телефонний зв'язок, а контроль зон відповідальності ведеться за допомогою паперових журналів, які часто ігноруються. Такий підхід значно знижує ефективність роботи та підвищує ризик помилок. Впровадження інформаційної системи електронного документообігу має значний потенціал для вирішення цих проблем. Така система дозволяє автоматизувати процес передачі даних, скоротити витрати на паперову документацію, оптимізувати функціонування цехів і покращити розподіл робочого часу персоналу. Крім того, вона забезпечує точний контроль за виконанням робіт і зменшує ризик людського фактору, підвищуючи загальну ефективність підприємства. Метою даної роботи є розробка інформаційної системи електронного документообігу для локомотивного депо. За програмну реалізацію відповідають наступні інструментальні засоби: мова програмування JavaScript, бібліотека React.js, платформа Node.js, Prisma ORM, система управління базами даних PostgreSQL. Очікується, що запропонована система дозволить не лише знизити матеріальні витрати, а й створити сучасну технологічну основу для підвищення безпеки та надійності роботи підприємства. Вона також сприятиме більш точному плануванню, моніторингу й аналізу робочих процесів, забезпечуючи адаптацію до зростаючих вимог ринку.

Ключові слова: інформаційна система, документообіг, бізнес-процеси, процеси управління проєктом.

О. LOBACH, A. SARZHEVSKYI

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM IN A LOCOMOTIVE DEPOT AND APPLICATION OF PROJECT MANAGEMENT PROCESSES

Automation of enterprise activities is one of the key directions in the development of information technologies under modern conditions. However, several industries, including the maintenance of electric trains, still rely on outdated methods for managing production processes. This creates significant challenges, as this sector is associated with a high level of responsibility and potential risks. Even minor errors can lead to severe financial losses or employee injuries. One of the most pressing issues remains document management. In many cases, the transmission of critical information is carried out via phone calls, and responsibility zones are monitored using paper logs, which are often neglected. Such an approach significantly reduces operational efficiency and increases the risk of errors. The implementation of an electronic document management system has significant potential to address these issues. Such a system allows for the automation of data transfer processes, reduces the costs associated with paper documentation, optimizes workshop operations, and improves the allocation of employees' working time. Moreover, it ensures accurate control over task execution and reduces the risk of human error, thereby enhancing the overall efficiency of the enterprise. The goal of this work is to develop and implement an electronic document management system for a locomotive depot. The program implementation is supported by the following tools: the JavaScript programming language, the React.js library, the Node.js platform, Prisma ORM, and the PostgreSQL database management system. The proposed system is expected not only to lower material costs but also to establish a modern technological foundation for improving the safety and reliability of the enterprise's operations. Additionally, it will facilitate more accurate planning, monitoring, and analysis of workflows, ensuring adaptation to the growing demands of the market.

Keywords: information system, document management, business processes, project management processes.

Вступ. Автоматизація процесів управління документами є не лише засобом зменшення операційної неефективності, але й критичним кроком до забезпечення безпеки даних, безперервності роботи та спрощеного зв'язку. У сучасному світі, де інформація є одним із ключових активів підприємств, ефективне управління документами стає основою стабільного функціонування та розвитку будь-якої організації.

Впровадження інформаційної системи електронного документообігу відкриває нові можливості для оптимізації бізнес-процесів, зменшення витрат часу та ресурсів, а також покращення якості прийняття управлінських рішень. Зокрема, у сфері технічного обслуговування локомотивних депо такі системи допомагають підвищити точність даних, покращити контроль за виконанням завдань та забезпечити прозорість і доступність інформації для всіх учасників процесу.

Такі технологічні рішення є життєво важливими для підтримки операційної стабільності та адаптації до сучасних викликів, які ставить перед підприємствами цифрова епоха. Вони не лише забезпечують злагоджену роботу системи, але й сприяють підвищенню конкурентоспроможності підприємств, даючи змогу ефективно вирішувати як поточні, так і майбутні завдання. У результаті автоматизація процесів управління документами стає одним із ключових факторів стійкого розвитку та інноваційного зростання.

Актуальність роботи. На сьогоднішній день простежується чіткий напрям розвитку людства в напрямку автоматизації всіх можливих процесів, шляхом впровадження інформаційних систем та технологій. Дослідники вважають, що цей процес призведе до скорочення 47% робочих місць строком до 2033 року [1-2]. Проте звісно не кожен вид

©, О. В. Лобач, А. І. Саржевський, 2024

діяльності можна автоматизувати. Недивлячись на важливість промислового виробництва та його технічний потенціал, за рівнем інтеграції інформаційних систем ця галузь значно поступається сфері послуг. Це пов'язано з тим, що набагато легше автоматизувати передбачувану фізичну працю, а ніж не передбачувану. Проте це не означає, що в галузі промислових виробництв немає видів діяльності, які можна автоматизувати або полегшити за допомогою імплементації інформаційних систем.

В контексті Укрзалізниці на даний момент не існує повноцінного аналогу такої розробки. В той же час один і той самий електропоїзд може за місяць проходити огляд на ремонтних станціях в різних частинах країни. Існуюче рішення поєднує заповнення та передачу документів в паперовому вигляді з подальшим внесенням їх окремих частин в базу даних зовсім іншим персоналом. Таким чином витрачається значна кількість зайвого часу на комунікацію між працівниками та перевиконання одних і тих самих дій різними підрозділами. При чому, в умовах війни, така система контролю призвела до фактичної втрати частки даних та обладнання, ускладнення передачі інформації між окремими підприємствами.

Постановка задачі. Метою даної роботи є розробка інформаційної системи електронного документообігу в локомотивному депо.

Вирішення задачі. Для визначення вимог до інформаційної системи було проведено аналіз існуючих наукових робіт. Актуальність та специфіка використання інформаційних систем у галузі технічного обслуговування транспортних засобів досліджується як іноземними, так і вітчизняними авторами [3]. Основними перевагами впровадження електронних систем документообігу є збереження часу, оптимізація ресурсів та підвищення прозорості роботи підприємств. Дослідники Абдалла та Фан [4] акцентують увагу на важливості сертифікації документів та пропонують використання цифрового підпису як ключового механізму для забезпечення безпеки документів у технічному обслуговуванні літаків.

У дослідженні [5] розглянули вплив автоматизації в транспортній галузі на працівників. Аналіз показав, що адаптація інформаційних систем залежить від специфіки вікових груп працівників та їхньої зайнятості. Наприклад, 32,1% працівників віком від 52 років стикаються з труднощами адаптації до складних цифрових систем, що свідчить про необхідність врахування демографічних особливостей під час розробки таких рішень.

Досвід впровадження інформаційних систем у залізничній галузі демонструє, що ключовими аспектами є оптимізація управління даними та інтеграція на всіх рівнях. Дослідники з Китаю [6] підтверджують ефективність клієнт-серверної архітектури для управління станом залізничних колій, зокрема використання реляційних баз даних Oracle та інструментів прогнозування стану об'єктів за

допомогою цифрових двійників [7-9]. В межах цеху з технічного обслуговування електропоїздів використання цієї технології може запобігти виникненню затримок та підвищенню витрат, за рахунок більш чіткого розуміння завантаженості платформ та стану електропоїздів [10].

Тему використання інформаційних систем в сфері технічного обслуговування літаків було розглянуто в рамках конференції «Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021». Дослідники Шмюкер, та Майер [11] вважали, що будь-який процес діагностики та проведення робіт повинен закінчуватися формуванням відповідної документації. Для її зберігання вони пропонують використовувати реляційні бази даних. Цікавою стороною дослідження є пропозиція авторів по використанню децентралізованої модульної системи зі стандартизованими параметрами. Таким чином можна досягти більшої гнучкості в умовах віддаленості підприємств один від одного.

Електронне управління документами – це процес захоплення, зберігання, пошуку, доступу, модифікації та видалення електронних документів, які містять інформацію, необхідну для підтримки бізнес-процесів організації [12]. Основними вимогами до систем документообігу є: збереження часу, ефективне використання простору і технологій, збільшення прозорості внутрішньої роботи підприємства, більша гнучкість фізичного розташування працівників, підвищення безпеки інформації [13-15]. Проте для реалізації цих переваг слід проводити попередній аналіз інформації, з якою доведеться працювати [16].

Цікавим є дослідження використання чотирьох різних систем електронного документообігу чотирма різними компаніями [17]. Дві з яких використовували готові програмні рішення, одна адаптоване, четверта ж замовляла розробку системи під свої потреби. Останнє рішення було дорожчим за попередні приклади, але ефективність його застосування показала найкращі результати.

Було проведено аналіз існуючих програмних рішень, їх переваг та недоліків [18-23]. На його основі напрямом реалізації було обрано web-застосунок з клієнт-серверною архітектурою.

Процес технічного обслуговування поїзду складається з багатьох етапів. На першому етапі, машиніст передає журнал черговому в депо. Цей журнал містить дані про номер поїзду, його пробіг, та внесені машиністами зауваження. Черговий зобов'язаний вести документацію про час прибуття поїзду, відповідальних за його передачу. Також до звіту переноситься інформація з журналу.

На другому етапі, черговий повинен продивитися історію обслуговування поїзду та виконати розрахунки для визначення типу обслуговування. Існують наступні види обслуговування:

- ТО2 – технічний огляд, який виконується кожні дві доби та триває півтори години;
- ПР1 – технічний огляд, який виконується через кожні 10000 кілометрів пробігу та триває 24 години.

В залежності від типу обслуговування, формується обхідний лист. Для ТО2 він не містить заздалегідь визначених робіт, в той час як для ПР1 існує сформований список завдань для виконання бригадою.

На третьому етапі черговий формує чергу з поїздів на обслуговування. Після цього машиніст повинен доставити обраний поїзд на обрану колію в цеху для подальшого обслуговування. Черговий зобов'язаний передати обхідний лист керівнику бригади.

На наступному етапі бригада проводить обслуговування поїзду згідно з обхідним листом, якщо виконується ПР1. Якщо ж поїзд проходить ТО2, працівники повинні усунути усі дефекти, зазначені машиністами при передачі в обслуговування.

Далі йде розгалуження. Якщо проводилося ТО2, то керівнику бригади необхідно заповнити обхідний лист, зазначивши виконані бригадою роботи. У випадку проведення ПР1, обхідний лист вже заповнений від початку і потребує лише проставлення марок працівників навпроти виконаної ними роботи зі списку. Марка працівника представляє собою його унікальний номер, зазначений в посвідченні.

В кінці керівник бригади повинен поставити свою марку у звіті, тим самим закривши його. Після цього він відносить звіт до інформаційного відділу депо, в якому секретар вносить усі данні зі звіту до бази даних інформаційної системи залізниці. На основі аналізу процесу формування звітів в локомотивному депо сформовано схему бізнес-процесів підприємства, що наведено на рисунку 1.

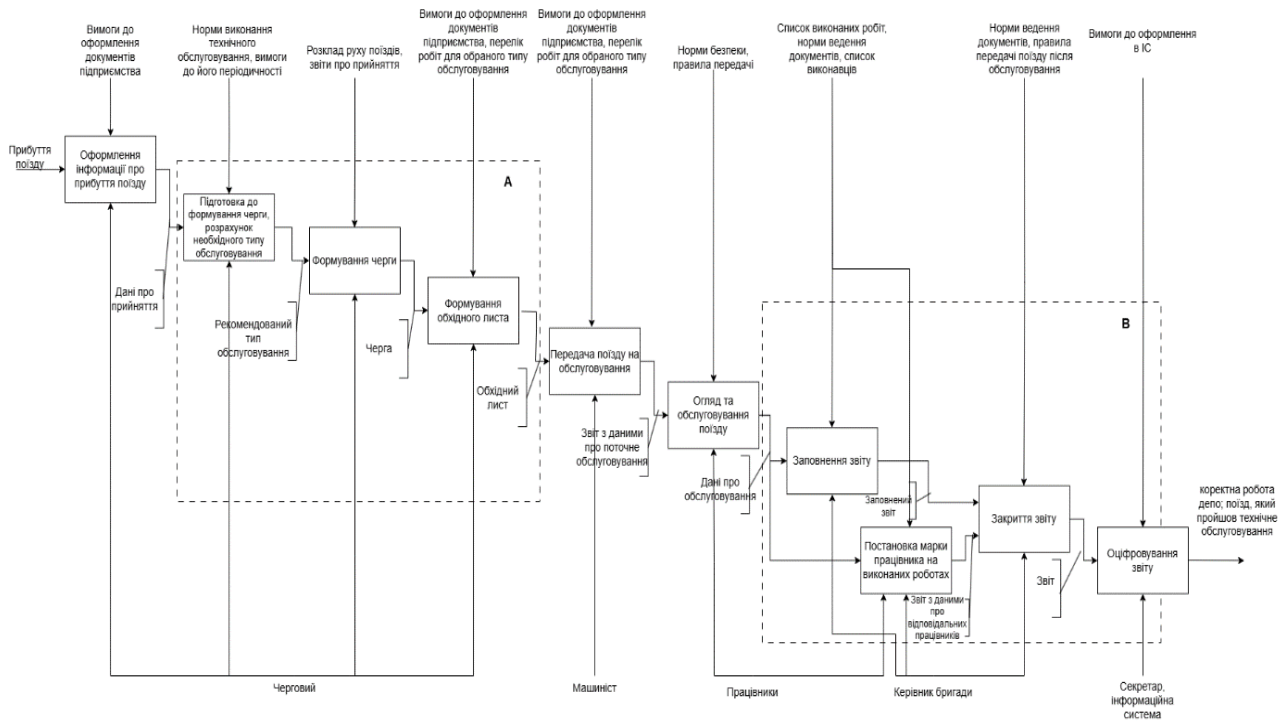


Рис. 1. Схема існуючих бізнес-процесів локомотивного депо

На рисунку квадратами «А» та «В» позначено процеси, які будуть автоматизовані. Так в першому з них, інформаційна система буде автоматично прораховувати рекомендований тип обслуговування на основі наявних в БД даних, формувати обхідний лист та чергу. В квадраті «В» застосунок дозволить усунути передачі документу та його заповнення в паперовому вигляді. Схему автоматизованих бізнес-процесів підприємства наведено на рисунку 2.

На рисунку 2 блакитним кольором позначено процеси, які зазнали змін в наслідок їх автоматизації. Так наприклад, за підготовчі етапи тепер відповідає інформаційна система, а не черговий. Процеси заповнення та закриття звіту все ще потребують участі працівників та керівника бригади, проте скорочено кількість часу на виконання цих дій. Оцифрування документу взагалі видалено зі схеми, так як вся інформація вже зберігається в електронному вигляді від початкових етапів.

Для автоматизації процесів документообігу в локомотивному депо було спроектовано та розроблено web-застосунок, що реалізує концепцію цифрового двійника та враховує сформовані в результаті проведеного аналізу вимоги до сучасної системи електронного документообігу. Клієнтська частина реалізована засобами бібліотеки мови програмування JavaScript – React.js. Її вибір обґрунтовується використанням віртуального DOM, що значно покращує продуктивність, мінімізуючи зміни у реальному DOM. Для реалізації серверної частини обрано платформу Node.js, яка надає доступ до великої кількості додаткових пакетів, що здатні полегшити процеси розробки. Як систему управління базами даних обрано PostgreSQL. Ця об'єктно-реляційна СУБД підтримує більшу частину стандарту SQL і пропонує безліч сучасних функцій, таких як тригери, збережені процедури та транзакційна цілісність. Для забезпечення обмеження доступу до

даних інформаційної системи випадкового рахунок інструменту Jsonwebtoken користувача, реалізовано процес автентифікації за

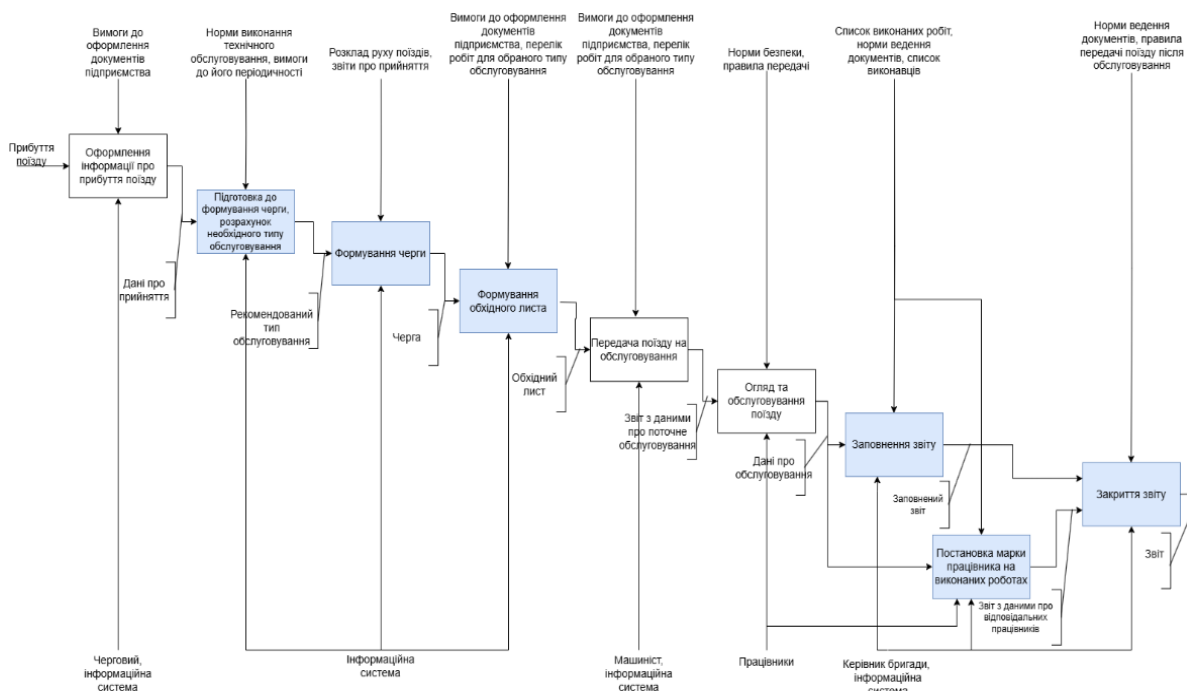


Рис. 2. Схема автоматизованих бізнес-процесів локомотивного депо

Інформаційна система передбачає дві групи користувачів: користувач – працівник локомотивного депо, адміністратор.

Ключовими можливостями адміністратора є внесення даних про поїзди та створення облікових записів. Реєстрація нового користувача передбачає наявність його контактної інформації, у вигляді

номеру телефону та електронної пошти, даних про стаж роботи та зображення посвідчення працівника. Адміністратор повинен заповнити всі поля форми, зображеної на рисунку 3, та натиснути на кнопку «Створити». Після цього працівник отримає логін та пароль для авторизації в системі у вигляді листа на зазначену електронну пошту.

Рис. 3. Форма створення користувача в застосунку «Е-Депо помічник»

Користувач зі спеціальністю черговий депо є відповідальним за внесення даних про отриманні поїзду в обслуговування. На основі заданої ним

інформації про пробіг та наявні проблеми розраховується рекомендований тип обслуговування та формується черга, зображена на рисунку 4.

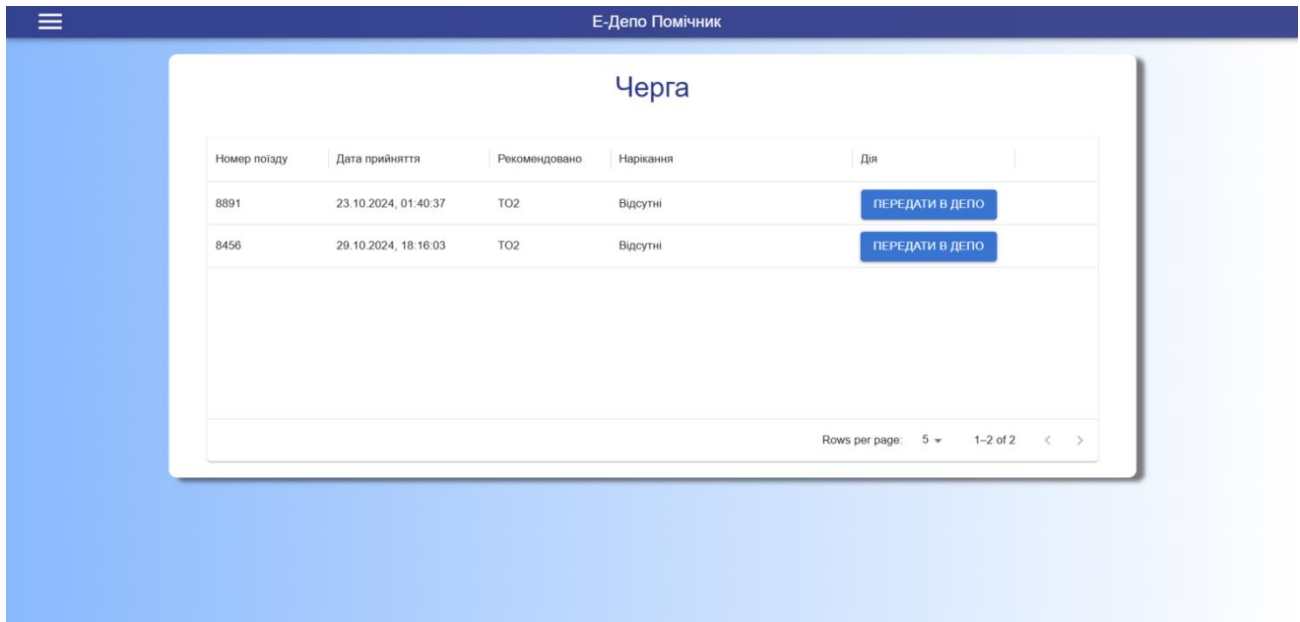


Рис. 4. Черга поїздів на обслуговування в застосунку «Е-Депо помічник»

Ключовою можливістю користувача зі спеціальністю машиніст є передача поїзду в обслуговування. Для цього йому необхідно обрати

колію. На основі списку колій та стану їх зайнятості формується цифровий двійник цеху, наведений на рисунку 5.

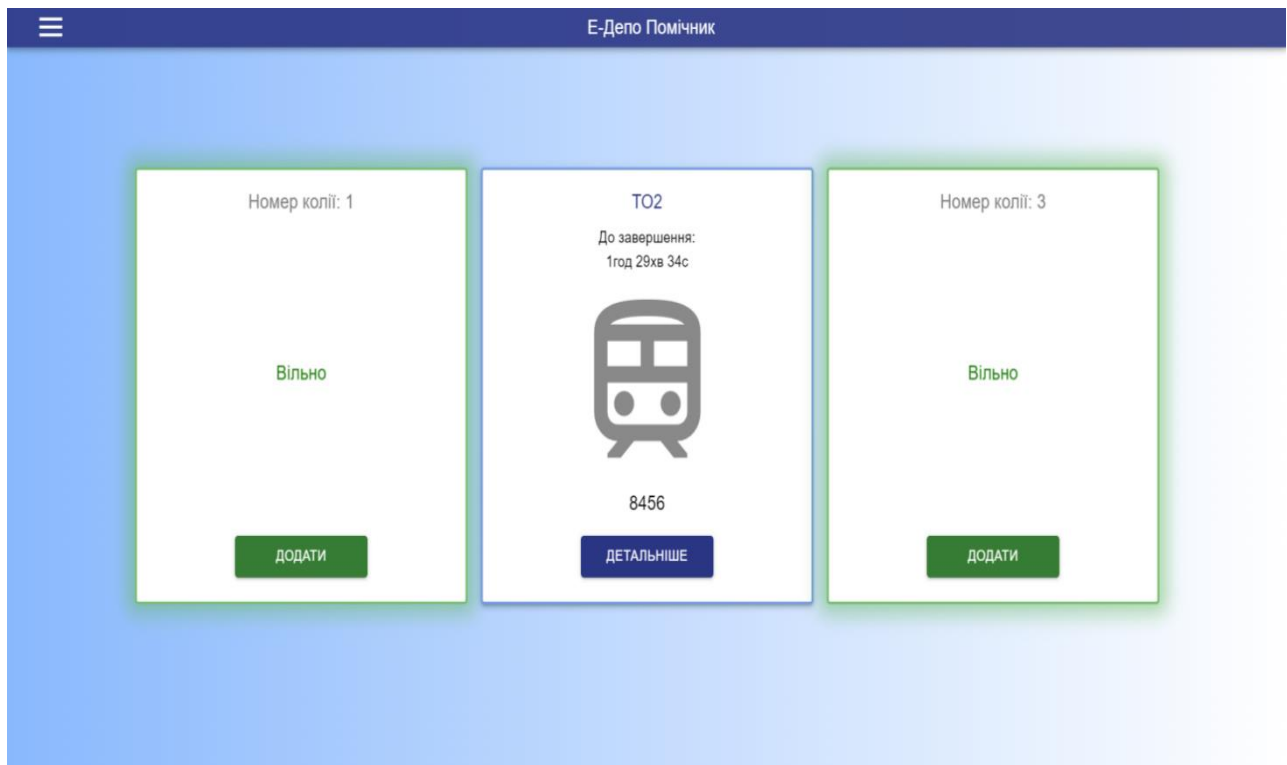


Рис. 5. Цифровий двійник цеху в застосунку «Е-Депо помічник»

Ключовим функціоналом для користувача зі спеціальністю керівник бригади є можливість формувати та закривати звіти з обслуговування. Сформований звіт містить повну інформацію про всі

етапи від прибуття в депо до часу завершення робіт. Навпроти кожного виконаного завдання встановлюється особиста марка працівника. Зовнішній вигляд звіту наведено на рисунку 6.

Звіт

Донецька залізниця Форма ТУ-28

Поточний ремонт №: 1
Електровава ВПВ: 8891
Форма ремонту: ПР1

ІНФОРМАЦІЯ ПРО ОТРИМАННЯ

Отримано:	10.10.2024, 18:05:05
Відповідальний за передачу:	Саржевський Андрій Ігорович
Номер марки працівника:	1111
Номер копії:	1
Відомі проблеми:	Вийшов з ладу 3-й трансформатор
Опис проблеми:	Вийшов з ладу 3-й трансформатор

ОСНОВНИЙ РЕМОНТ

Найменування робіт	Відповідальний
Ревізія моторно-вісьових підшипників зі зміною фільтральної пружки і мастила двох колесо-моторних блоків.	1111
Вивести дві колісні пари і прослухати роботу бокових моторних підшипників.	1111
Огляд буксових вузлів колісних пар з зняттям передньої кришки.	8812
Огляд і ремонт кожухів зубчастої передачі. При знятті кожухів виконати ревізію зубчастої передачі.	8812
Огляд і регулювання гальмівної важільної передачі руного гальма. Зміна гальмових колодок.	8812
Огляд і ремонт вентиляційних патрубків, очистка запобіжних сіток.	8812
Огляд і ремонт рам, візів, кузовів, головних, бокових, додаткових опор, підвіски тягових дугиунів, ресорного підвішування.	8812
Огляд колісних пар	8812
Очищення сіток вентиляційних патрубків з підйомом кузова, ремонт вентиляційних патрубків.	8812
Ревізія опор з підйомом кузова.	8812

Рис. 6. Сформований звіт в застосунку «Е-Депо помічник»

Висновок. Авторами роботи було спроектовано та розроблено інформаційну систему електронного документообігу в локомотивному депо у вигляді web-застосунку. Розроблений програмний продукт має потенціал щодо покращення та подальшої розробки додаткового функціоналу. За рахунок впровадження інформаційної системи електронного документообігу в локомотивному депо можна покращити ефективність роботи цеху та скоротити витрати часу приблизно на 15%. Це дозволить обробляти більше електропоїздів за добу, що приведе до зниження собівартості технічного огляду однієї машини.

Список літератури

- Frey C. B., Osborne M. A. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*. 2017. Vol. 114. P. 254–280. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.08.01 (accessed: 19.11.2023).
- Chui M., Manyika J., Miremadi M. Where Machines Could Replace Humans-And Where They Can't (Yet). *McKinsey*. 2016. P. 58–69. DOI: 10.1016/j.jsis.2020.101600 (accessed: 19.11.2023).
- Alomar I., Yatskiv (Jackiva) I. Digitalization in Aircraft Maintenance Processes. *Aviation*. 2023. Vol. 27, no. 2. P. 86–94. DOI: 10.3846/aviation.2023.18923 (accessed: 20.11.2023).
- Abdallah A. A., Fan I.-S. Emerging Challenges of Digital Aircraft Operations and Maintenance: A Knowledge Management Perspective. *SSRN Electronic Journal*. 2020. DOI: 10.2139/ssrn.3718062 (accessed: 20.11.2023).
- Burtylev I. N., Mokhun K. V., Bodnya Y. V., Yukhnovich D. N. Development of Electronic Document Management Systems: Advantage and Efficiency. *Scientific & Technical Information*. 2013. P. 1–9. DOI: 10.5923/s.scit.201301.01 (accessed: 21.11.2023).
- Jia C., Xu W., Wang H. Study of Management Information System of Railway Permanent Way Safety Risks and Comprehensive Evaluation. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 15. P. 1293–1297. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.239 (accessed: 20.11.2023).
- Heller J. *Pro Oracle SQL Development*. Berkeley, CA: Apress, 2023. P. 3–28.
- Bisanti G. M. Digital twins for aircraft maintenance and operation: A systematic literature review and an IoT-enabled modular architecture. *Internet of Things*. 2023. Vol. 24. P. 100991. DOI: 10.1016/j.iot.2023.100991 (accessed: 23.11.2023).
- Wang Z. Mobility Digital Twin: Concept, Architecture, Case Study, and Future Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. P. 1. DOI: 10.1109/jiot.2022.3156028 (accessed: 23.11.2023).
- Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Lin Y.-h. Digital twins for managing railway maintenance and resilience. *Open Research Europe*. 2021. Vol. 1. P. 91. DOI: 10.12688/openreseurope.13806.1 (accessed: 23.11.2023).
- Schmücker R., Meyer H. Digitalization and data management in aircraft maintenance based on the example of the composite repair process. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. 2021. Bonn, Germany, August 31 - September 2, 2021. DOI: 10.25967/550066 (accessed: 20.11.2023).
- Sprague R. H. Electronic Document Management: Challenges and Opportunities for Information Systems Managers. *MIS Quarterly*. 1995. DOI: 10.2307/249710 (accessed: 20.11.2023).
- Ragimova N. A., Hajimahmud A. V., Soltanaga A. V. Analysis of Main Requirements for Electronic Document Management Systems. *ScienceRise*. 2020. Vol. 1. P. 28–31. DOI: 10.21303/sr.v0i1.1148 (accessed: 21.11.2023).
- Jordan S., Zabukovšek S. S., Klančnik I. Š. Document Management System – A Way to Digital Transformation. *Naše gospodarstvo/Our economy*. 2022. Vol. 2. P. 43–54. DOI: 10.2478/ngoe-2022-00104 (accessed: 21.11.2023).
- Burtylev I. N., Mokhun K. V., Bodnya Y. V., Yukhnovich D. N. Development of Electronic Document Management Systems: Advantage and Efficiency. *Scientific & Technical Information*. 2013. P. 1–9. DOI: 10.5923/s.scit.201301.01 (accessed: 21.11.2023).
- Matias R., Piedade M. B. Multidimensional Models Supported by Document-Oriented Databases. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham. 2023. P. 156–167. DOI: 10.1007/978-3-031-40725-3_14 (accessed: 21.11.2023).
- Guo F., Jähren C. T., Turkan Y. Electronic Document Management Systems for the Transportation Construction Industry. *International Journal of Construction Education and Research*. 2019. P. 1–16. DOI: 10.1080/15578771.2019.168561 (accessed: 22.11.2023).

18. Ogli A. E. T. Software for Electronic Document Management System of Technical Documentation on Railway Automation and Telemechanics. *JournalNX*. 2021. Vol. 7. P. 204–209. DOI: 10.1007/978-3-030-85057-9_40 (accessed: 21.11.2023).
19. Baratov D., Astanaliev E. Fundamental Strategy of the Method of Accounting and Control of Automation and Telemechanics Devices. *Universum: Technical sciences*. 2022. Vol. 98. P. 5–10. DOI: 10.32743/unitech.2022.98.5.13776 (accessed: 21.11.2023).
20. Seethamraju R. Adoption of Software as a Service (SaaS) Enterprise Resource Planning (ERP) Systems in Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs). *Information Systems Frontiers*. 2014. P. 475–492. DOI: 10.1007/s10796-014-9506-5 (accessed: 21.11.2023).
21. RAMCO Airline on Cloud. Ramco. Available at: <https://www.ramco.com/en-au/products/aviation-software/airlines-industry/> (accessed: 21.11.2023).
22. Lebeau J. Achieving productivity gains through an Integrated M&E System. *Aircraft IT eJournal*. 2022. Available at: <https://www.aircraftit.com/articles/case-study-achieving-productivity-gains-through-an-integrated-me-system/?area=mro> (accessed: 21.11.2023).
23. Kalynovskyi A. O., Holomovzyi V. M., Kalynovska N. L., Kalynovska O. R. Analyzing the State of Information Provision of the Maintenance and Renewal of Aviation Equipment. *Business Inform*. 2021. Vol. 11, no. 526. P. 162–172. DOI: 10.32983/2222-4459-2021-11-162-172 (accessed: 22.11.2023).

Надійшла (received) 18.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

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

Саржевський Андрій Ігорович (Sarzhevskiy Andrii) – студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: sarzhevskiyandrey@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1164-4439>.

А. В. ЛОЗИНСЬКА, О. В. ЛОБАЧ

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОРЕНДИ ТА КУПІВЛІ ЖИТЛА В НІДЕРЛАНДАХ З ВПРОВАДЖЕННЯМ АЛГОРИТМУ КОНТЕКСТНОГО ПОШУКУ: ПЕРСОНАЛІЗОВАНИЙ ТА ПРИШВИДШЕНИЙ ПІДБІР НЕРУХОМОСТІ

Сучасний стан ринку нерухомості в більшості європейських країн, зокрема в Нідерландах, потребує впровадження інноваційних рішень, що здатні полегшити й пришвидшити процес пошуку житла та задоволити потреби його шукачів. Здебільшого, це зумовлено браком достовірних, актуальних даних та ігноруванням необхідності адаптації наявних web-застосунків та інформаційних систем для іноземців, які не володіють нідерландською мовою, що дуже важливо в умовах зростаючої міграції. Крім того, існуючі рішення часто пропонують інформацію про нерухомість, яка варіюється залежно від налаштувань користувача, зокрема відомостей про його вік та національність, що призводить до дискримінації. З огляду на це актуальним стає впровадження застосунків, які містять детальні, актуальні та достовірні дані про житлові об'єкти, а також дозволяють налаштовувати процес підбору оселі під індивідуальні потреби користувачів. Метою даної роботи є розробка інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах, створення алгоритму контекстного пошуку для пришвидшення знаходження нерухомості, а також його впровадження до даної web-системи. Алгоритм складається з трьох основних етапів. На першому кроці відбувається геокодування введеної користувачем адреси. Другий етап охоплює надсилання запиту до Google Places, розрахунок радіуса пошуку на основі меж квадрата, а надалі – формули Гаверсина, та перевірку об'єктів, що містяться у базі даних сервісу, на їх потрапляння в розраховану зону. На третьому кроці відбувається відправлення координат першого отриманого об'єкта та типу нерухомості на сервер. У разі знаходження оголошень у базі даних інформаційної системи, вони показуються користувачеві. Розроблена інформаційна система та алгоритм контекстного пошуку, впроваджені у неї дозволяють надати шукачам житла детальну, актуальну та достовірну інформацію про об'єкти нерухомості, доступні для оренди та купівлі, пришвидшити процес пошуку оселі та задоволити потреби її шукачів. Також головний функціонал web-системи охоплює надання можливості публікації, зміни, видалення оголошень та встановлення зв'язку з їх авторами.

Ключові слова: інформаційна система, об'єкти нерухомості, житло, оселя, оренда, купівля, формула Гаверсина, алгоритм, контекстний пошук.

А. LOZINSKA, O. LOBACH

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION SYSTEM FOR SOLVING THE PROBLEM OF RENTING AND BUYING HOUSING IN THE NETHERLANDS WITH THE INTRODUCTION OF A CONTEXTUAL SEARCH ALGORITHM: PERSONALIZED AND ACCELERATED SELECTION OF REAL ESTATE

The current state of the real estate market in most European countries, including the Netherlands, requires the introduction of innovative solutions that can facilitate and speed up the process of finding housing and meet the needs of its applicants. This is largely due to the lack of reliable, up-to-date data and the neglect of the need to adapt existing web applications and information systems for foreigners who do not speak Dutch, which is very important in the context of growing migration. In addition, existing solutions often offer information about real estate that varies depending on the user's preferences, including information about their age and nationality, which leads to discrimination. In view of this, it becomes important to introduce applications that contain detailed, up-to-date, and reliable data on residential properties, as well as allow customizing the process of selecting a home to meet the individual needs of users. The purpose of this paper is to develop an information system for solving the problem of renting and buying housing in the Netherlands, to create a contextual search algorithm to speed up the search for real estate, and to implement it in this web system. The algorithm consists of three main stages. The first step involves geocoding the address entered by the user. The second stage involves sending a request to Google Places, calculating the search radius based on the boundaries of the square, and then using the Gaversinus formula, and checking the objects contained in the service's database for their inclusion in the calculated area. The third step involves sending the coordinates of the first received object and the type of real estate to the server. If ads are found in the information system database, they are displayed to the user. The developed information system and the contextual search algorithm implemented in it allow providing home seekers with detailed, up-to-date and reliable information about real estate available for rent and purchase, speeding up the process of finding a home and meeting the needs of home seekers. The main functionality of the web system also includes the ability to publish, modify, delete ads and establish communication with their authors.

Keywords: information system, real estate objects, housing, home, rent, purchase, Gaversinus formula, algorithm, contextual search.

Вступ. На фоні глобальних змін у сфері економіки та соціальних процесів багато країн, зокрема й Нідерланди, зіштовхуються з низкою проблем у сфері нерухомості. Зростання масштабів переміщень людей у світі через геополітичні та економічні обставини провокують підвищений попит на доступне житло, ускладнюючи процеси адаптації новоприбулих. Крім того, наразі у Нідерландах спостерігається висока конкуренція серед агентств нерухомості, а її пошук займає досить тривалий час через наявність недостовірної або неповної інформації про об'єкти. Дані чинники викликають необхідність у розробці ефективного рішення для пошуку житла.

Актуальність роботи. В умовах таких викликів на ринку нерухомості розробка інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах є дуже актуальною, оскільки дозволяє прискорити й спростити процеси пошуку оселі, зокрема і для новоприбулих у країну, забезпечити доступ до актуальної інформації та налагодити взаємодію між шукачами нерухомості та тими, хто її пропонує.

Отже, дана система сприяє інтеграції іноземців, зокрема й біженців, оскільки наявність комфортного житла є одним з найважливіших аспектів цього процесу [1]. Крім того, вона відкриває нові можливості для розвитку агентств нерухомості в

©, А. В. Лозінська, О. В. Лобач, 2024

умовах високої конкуренції та прискорює процес пошуку оселі.

Постановка задачі. Метою даної роботи є розробка інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах, створення алгоритму контекстного пошуку для пришвидшення знаходження нерухомості, а також його впровадження до даної web-системи.

Вирішення задачі. Дослідженням ринку нерухомості європейських країн і, зокрема, Нідерландів, займалися вітчизняні та іноземні автори [2-12]. В роботах були досліджені різні аспекти, але основна увага приділялась впливу інформаційних систем на дану сферу. На основі досліджень можна зробити висновок, що пандемія коронавірусу пришвидшила цифровізацію ринку нерухомості в Нідерландах. Водночас провадження інноваційних технологій та web-систем має потенціал для розв'язання задачі задоволення потреб шукачів житла, проте такі рішення все ще перебувають на етапі розвитку.

Питанням проблем наявних рішень займалися автори [13-17], а пропозиції щодо їх покращення наведені дослідниками [18-23]. Отже, наразі основною проблемою інформаційних систем є недостатність та недостовірність інформації. Проте також важливо, щоб web-система оренди та купівлі житла мала електронну карту, правильне розподілення даних на сторінках, легкий у використанні та інтерактивний інтерфейс. Водночас інформаційна система повинна забезпечувати рівний доступ до інформації для всіх користувачів, не обмежуючи її та не змінюючи залежно від національності чи інших ознак, що можуть призвести до дискримінації. Крім того, web-система має бути також спрямована не лише на нідерландців, а й на іноземців, оскільки наразі у Нідерландах спостерігається активна міграція з інших

країн, зокрема з України [24]. Отже, система повинна бути мультимовною, щоб допомогти людям забезпечити зручний доступ до необхідної інформації для всіх, незалежно від мови.

Всі ці аспекти були враховані при розробці інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах.

Для реалізації фронтенд-частини даної web-системи було використано бібліотеку React.js, оскільки вона забезпечує високу продуктивність системи під час її роботи з великими обсягами даних. Дизайн створений за допомогою фреймворку Bootstrap, який містить великий набір інструментів для створення web-застосунків, що надає можливість значно пришвидшити розробку. Крім того, для оформлення сторінок системи була використана мова розмітки CSS, оскільки вона дозволяє додати їй креативності. Бекенд-частина web-системи була розроблена з використанням середовища для виконання JavaScript, Node, та фреймворку Express.js. Таке поєднання дозволяє забезпечити високу продуктивність та масштабованість.

MongoDB була визначена як оптимальний варіант системи управління базами даних, оскільки вона має здатність витримувати високі навантаження при роботі з багатьма користувачами одночасно, зберігаючи при цьому високу продуктивність. Крім того, ця СУБД надає можливість працювати без жорстко визначеної схеми даних, що важливо для сфери нерухомості, де кожен об'єкт може мати різні характеристики.

Було визначено дві ролі для взаємодії з інформаційною системою: незареєстрований і зареєстрований користувач. Основним функціоналом першого є можливість реєстрації та перегляду профілів агентів нерухомості та оголошень, їх фільтрація та сортування, виконання контекстного пошуку. На рисунку 1 показані об'єкти нерухомості, доступні для купівлі.

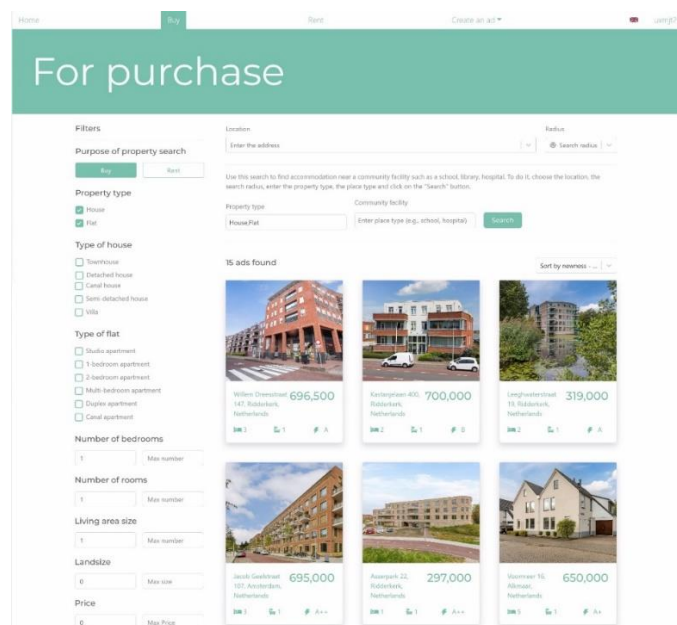


Рис. 1. Сторінка «Ву» інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах

На рисунку 2 показаний результат застосування фільтрації у разі вибору таких фільтрів: «Location» – «Asserpark, Ridderkerk, Nederland», «Radius» – «+10km», «Purpose of property search» – «Buy», «Property type» – «House», «Type of house» – «Canal

house», «Number of bedrooms» – від 1 до 5, «Number of rooms» – від 2 до 5, «Energy label» – «A++», «A+» та «A», «Availability of solar panels» – «ні», «Price» – від 0 до 350000, «Availability of a garden» – «ні», «Other external spaces» – «Balcony, loggia, or neither».

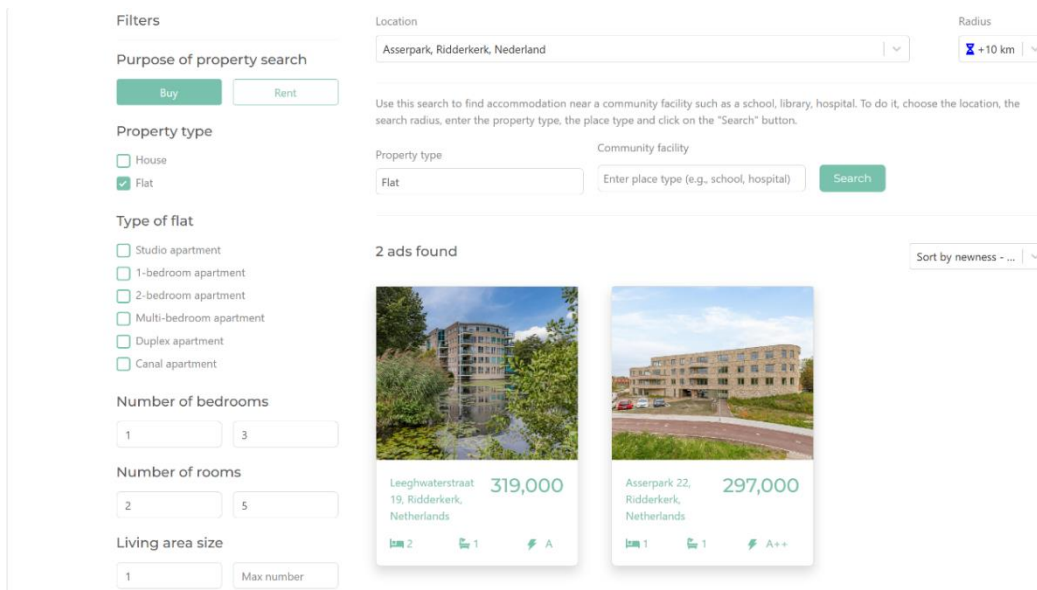


Рис. 2. Результат виконання фільтрації

Зареєстрований користувач володіє ширшим набором функцій. Цій ролі доступна публікація оголошень, їх перегляд, редагування та видалення. Також можливе додавання певних об'єктів

нерухомості до обраного (Рис. 3), редагування власного профілю та виконання процедури авторизації, виходу з облікового запису.

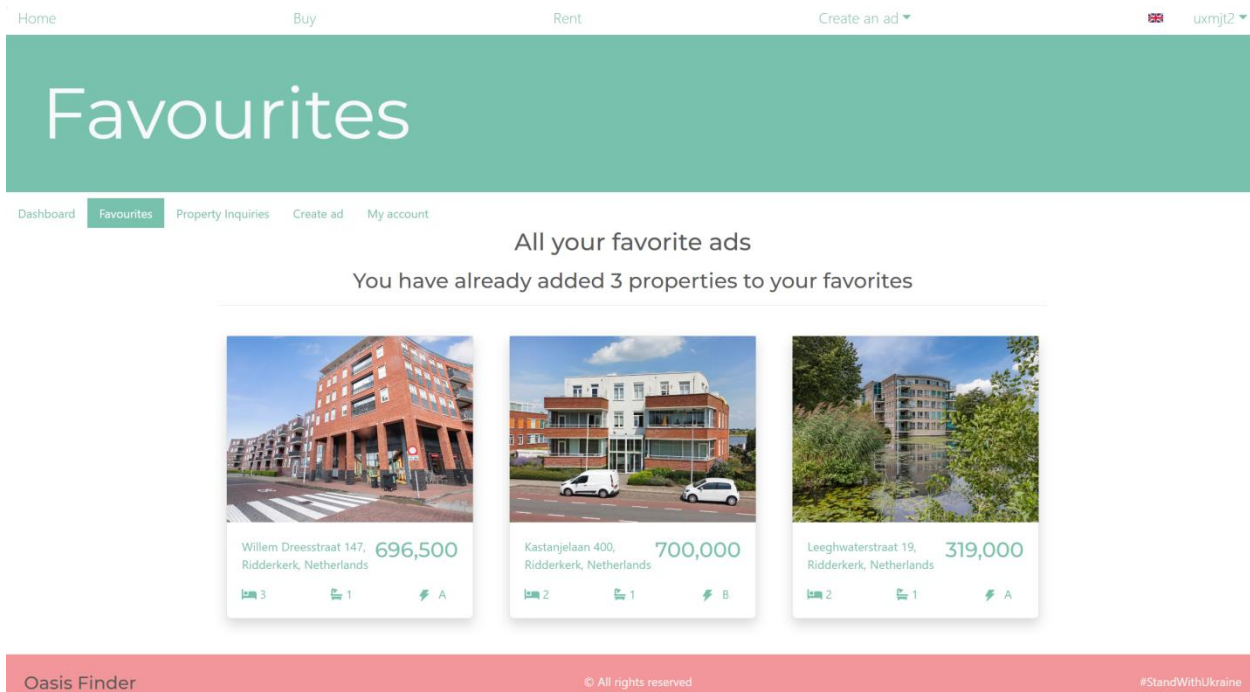


Рис. 3. Сторінка «Favourites» інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах

Також для зареєстрованого користувача доступна можливість зв'язуватись з автором оголошення за допомогою форми зворотного зв'язку. Крім того, якщо був надісланий лист (Рис. 4) щодо певного

будинку або квартири, то такий об'єкт починає демонструватися користувачу на сторінці «Property Inquiries» (Рис. 5).

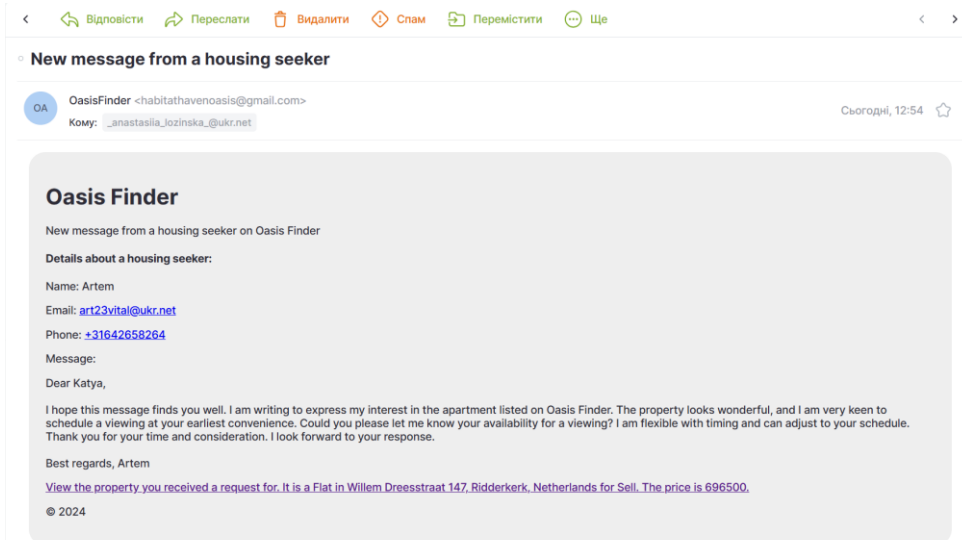


Рис. 4. Приклад листа, який отримав автор оголошення від шукача житла

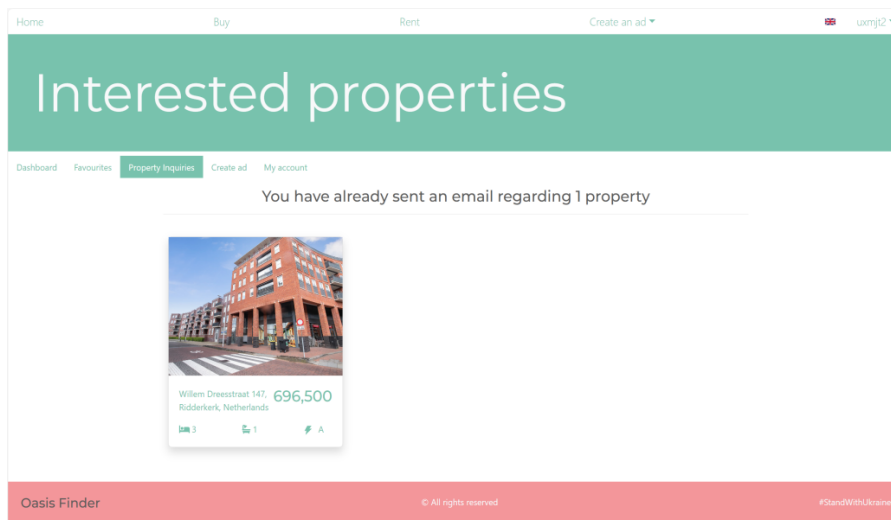


Рис. 5. Сторінка «Property Inquiries» інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах

Інформаційна система для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах є мультимовною. Web-система має англomовну, українськомовну та нідерландськомовну версії, кожна з яких доступна для всіх, незалежно від ролі.

Для зареєстрованого користувача, як і для незареєстрованого, також доступна можливість перегляду. Крім того, ця роль також може переглядати оголошення, фільтрувати їх та відсортовувати. Сортування можливе за ціною та за датою публікації об'єкта нерухомості у системі, тобто від найдешевших до найдорожчих, від найсвіжіших до найстаріших та навпаки. Також варто зазначити, що зареєстрований користувач може виконувати контекстний пошук.

Для реалізації контекстного пошуку в інформаційній системі розроблено функціонал, що дозволяє користувачам знаходити нерухомість певного типу, наприклад будинок або квартира, в обраній ними зоні, орієнтуючись на близькість до соціальних об'єктів, таких як бібліотеки, школи, лікарні тощо. Функціональність забезпечується за допомогою спеціально розробленого алгоритму.

Всього є три основних етапи алгоритму. Першим з них є геокодування введеної адреси шляхом надсилання запиту до сервісу Google Geocoding API.

Другий крок – це пошук об'єктів, які знаходяться поблизу. Для цього надсилається запит до Google Places API. Далі вже даний сервіс обчислює межі квадрата, який охоплює коло радіуса пошуку, з метою прискорення процесу. Потім Google Places API відправляє запит зі знайденим радіусом та типом соціального об'єкта до своєї бази даних. У разі, якщо у відповідь сервіс отримує перелік географічних координат, відбувається їх перевірка на потрапляння до зони пошуку згідно з формулою Гаверсінуса [25], яка враховує кривизну Землі. За допомогою неї обчислюється відстань між двома точками на сфері за їх широтою та довготою. Якщо вона менша або дорівнює радіусу, об'єкт додається до результатів.

Останнім етапом алгоритму є відправлення запиту на сервер, в якому передаються координати першого об'єкта та тип нерухомості. У разі, якщо оголошення знайдені у базі даних, вони демонструються користувачу.

Варто зазначити, що у разі, якщо не було отримано ніяких географічних координат, тобто ніякі об'єкти не потрапили до меж квадрата або вже до зони пошуку згідно з формулою Гаверсінуса, то користувачу показується повідомлення, що оголошень не знайдено.

Всі кроки алгоритму продемонстровано у вигляді блок-схеми на рисунку 5, а приклад його роботи у системі у разі вибору «Location» – «Middelharnis, Nederland», «Radius» – «+10 km», «Property type» – «House», «Community Facility» – «school» – на рисунку 6.

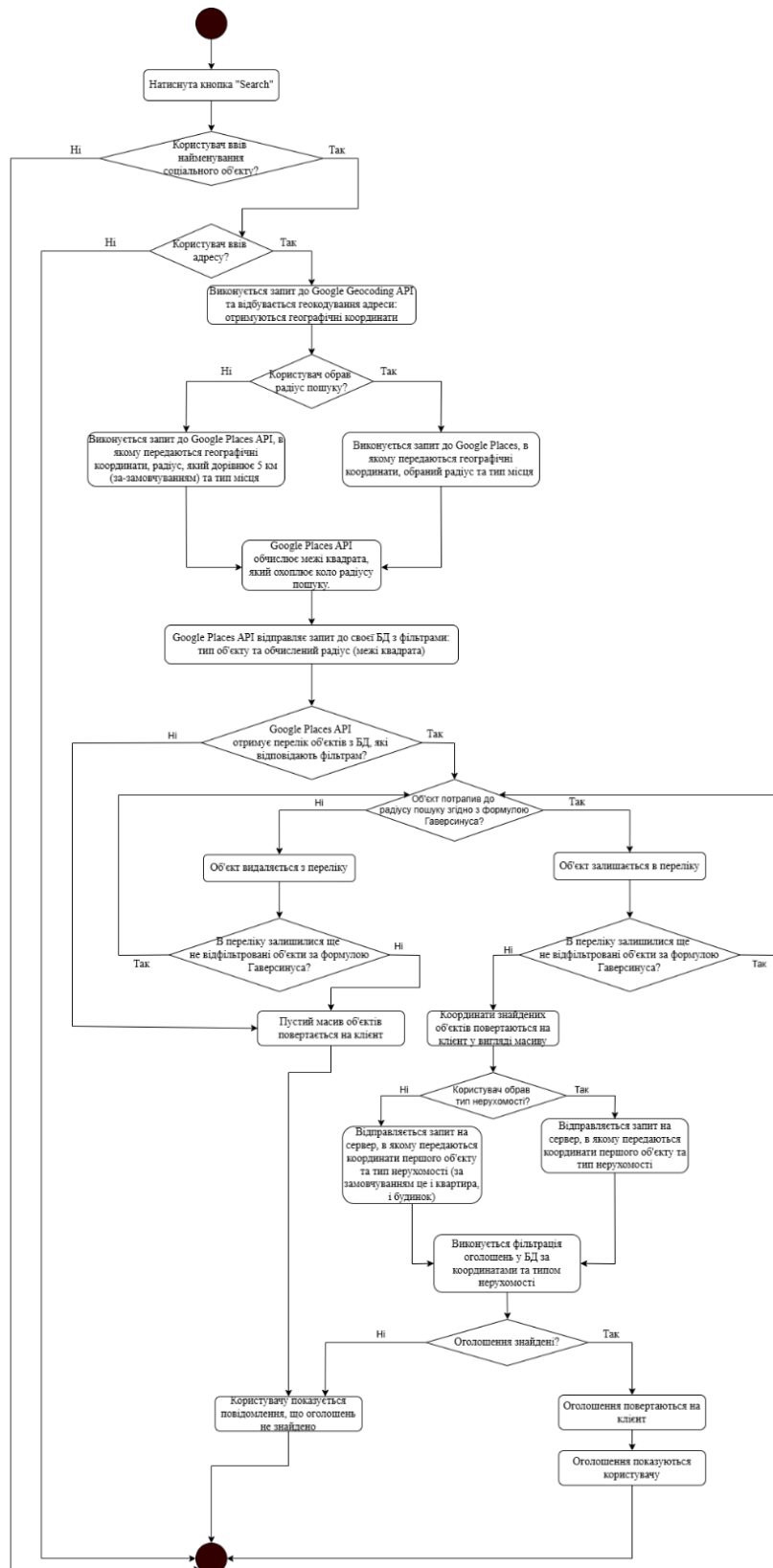


Рис. 5. Алгоритм контекстного пошуку, реалізований у інформаційній системі

Location: Middelharnis, Nederland

Radius: +10 km

Use this search to find accommodation near a community facility such as a school, library, hospital. To do it, choose the location, the search radius, enter the property type, the place type and click on the "Search" button.

Property type: House

Community facility: school

Search

2 ads found

Sort by newness - ...

Рис. 6. Результати виконання контекстного пошуку

Висновок. Створено та впроваджено у web-систему алгоритм контекстного пошуку, який дозволяє знаходити об'єкти нерухомості в обраному радіусі від певної адреси та соціального закладу. Інформаційна система значно покращує процес підбору оселі та відповідає потребам учасників ринку житла в Нідерландах. Дана web-система має значний потенціал для подальшого вдосконалення та розвитку, з можливістю інтеграції нових функцій, що дозволить ще більше покращити досвід користувачів і адаптувати систему до змінюваних вимог ринку нерухомості.

Список літератури

- Hynie M. Refugee integration: Research and policy. *Peace and Conflict: Journal of Peace Psychology*. 2018. Vol. 24, no. 3. P. 265–276. URL: <https://doi.org/10.1037/pac0000326> (date of access: 05.11.2024).
- Petermann J. Development of real estate marketing – trends for the future. *Marketing Science & Inspirations*. 2021. Vol. 16, no. 4. P. 10–19. URL: <https://doi.org/10.46286/msi.2021.16.4.2> (date of access: 05.11.2024).
- A Systematic Review of Smart Real Estate Technology: Drivers of, and Barriers to, the Use of Digital Disruptive Technologies and Online Platforms. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, no. 9. P. 3142. URL: <https://doi.org/10.3390/su10093142> (date of access: 05.11.2024).
- Chou S.-W., Chiang C.-H. Understanding the formation of software-as-a-service (SaaS) satisfaction from the perspective of service quality. *Decision Support Systems*. 2013. Vol. 56. P. 148–155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.05.013> (date of access: 05.11.2024).
- Internet of Things (IoT): From awareness to continued use / A. Koohang et al. *International Journal of Information Management*. 2022. Vol. 62. P. 102442. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102442> (date of access: 05.11.2024).
- Garcia-Teruel R. M. Legal challenges and opportunities of blockchain technology in the real estate sector. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 129–145. URL: <https://doi.org/10.1108/jppel-07-2019-0039> (date of access: 06.11.2024).
- Naeem N., Rana I. A., Nasir A. R. Digital real estate: a review of the technologies and tools transforming the industry and society. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. Vol. 1, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00016-0> (date of access: 06.11.2024).
- N. Siniak. The impact of proptech on real estate industry growth. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869. P. 062041. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/869/6/062041> (date of access: 06.11.2024).
- Newell G. The changing real estate market transparency in the European real estate markets. *Journal of Property Investment & Finance*. 2016. Vol. 34, no. 4. P. 407–420. URL: <https://doi.org/10.1108/jpif-07-2015-0053> (date of access: 06.11.2024).
- Veldhuizen S. v., Vogt B., Voogt B. Internet searches and transactions on the Dutch housing market. *Applied Economics Letters*. 2016. Vol. 23, no. 18. P. 1321–1324. URL: <https://doi.org/10.1080/13504851.2016.1153785> (date of access: 06.11.2024).
- Veuger J. COVID-19 and digitalization: Its influence in the Dutch real estate market process. *International Journal of Real Estate Studies*. 2020. Vol. 13, no. 4. P. 415–436. URL: <https://doi.org/10.46737/ijres.v14iS1.67> (date of access: 07.11.2024).
- Luca O., Geis A. Real Estate in the Netherlands: A Taxonomy of Risks and Policy Challenges. *IMF Working Papers*. 2021. Vol. 2021, no. 206. P. 1. URL: <https://doi.org/10.5089/9781513589565.001> (date of access: 07.11.2024).
- Uses of Websites for Effective Real Estate Marketing / M. Bond et al. *Journal of Real Estate Portfolio Management*. 2000. Vol. 6, no. 2. P. 203–211. URL: <https://doi.org/10.1080/10835547.2000.12089601> (date of access: 07.11.2024).
- D. Koch. Real Estate Image Analysis: A Literature Review. *Journal of Real Estate Literature*. 2019. Vol. 27, no. 2. P. 269–300. URL: <https://doi.org/10.22300/0927-7544.27.2.269> (date of access: 07.11.2024).
- A Map-Based Recommendation System and House Price Prediction Model for Real Estate / M. Mubarak et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 178. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi11030178> (date of access: 07.11.2024).

16. Boeing, G., Besbris, M., Wachsmuth, D. *et al.* Tilted platforms: rental housing technology and the rise of urban big data oligopolies. *Urban Transformations*. 2021. Vol. 3, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s42854-021-00024-2> (date of access: 08.11.2024).
17. Boeing G. Online Rental Housing Market Representation and the Digital Reproduction of Urban Inequality. *SSRN Electronic Journal*. 2019. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3419532> (date of access: 08.11.2024).
18. Martínez L., Contreras J., Valdez Cervantes L. d. C. Geographic Geolocation Search in Real Estate Marketplaces. *The Thirteenth Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. 2015. URL: <https://doi.org/10.18687/laccei2015.1.1.280> (date of access: 08.11.2024).
19. J. Sun. Eye-Tracking Technology in Online Real Estate Rental. *Scientific Programming*. 2021. Vol. 2021. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/8851657> (date of access: 11.11.2024).
20. I. W., I. A. Responsive Web Design Techniques. *International Journal of Computer Applications*. 2016. Vol. 150, no. 2. P. 18–27. URL: <https://doi.org/10.5120/ijca2016911463> (date of access: 11.11.2024).
21. The Impact of Internet Real Estate Intermediary Platform on the Real Estate Market / W. Zhang et al. *ICCSE'19: The 4th International Conference on Crowd Science and Engineering*, Jinan China. New York, NY, USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3371238.3371259> (date of access: 11.11.2024).
22. Suarez, Jose L. The Real Estate Industry in the Netherlands. *IESE Business School Working Paper*. 2005. P. 8-10. URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.673282> (date of access: 11.11.2024).
23. Steegmans J., de Bruin J. Online housing search dataset: Information flows of real estate platform users. *Data in Brief*. 2021. Vol. 38. P. 1-10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107327> (date of access: 12.11.2024).
24. W. Opiola. War and politics. The 2022 Russian invasion of Ukraine and refugee crisis on the eastern EU border from the perspective of border studies. *Pogranicze. Polish Borderlands Studies*. 2022. Vol. 10, no. 1. P. 7–22. URL: <https://doi.org/10.25167/brs4791> (date of access: 12.11.2024).
25. Implementation of Haversine Formula for Counting Event Visitor in the Radius Based on Android Application / M. Z. Alam, A. Manaf. *CITSM'16: The 4th International Conference on Cyber and IT Service Management*, Salatiga, Indonesia, 2016. IEEE. URL: <https://doi.org/10.1109/CITSM.2016.7577575> (date of access: 15.11.2024).

Надійшла (received) 14.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Лозинська Анастасія Віталіївна (Lozinska Anastasiia) – студентка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: anastasiia20lozinska@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8529-6260>

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

Лб. С. ЧЕРНОВА, С. Д. ТИТОВ, І. А. ЖУРАВЕЛЬ, Лд. С. ЧЕРНОВА

ЗАСТОСУВАННЯ ЗАГАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ В ДРОБОВО-ЛІНІЙНИХ ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ В УПРАВЛІННІ ПРОЕКТАМИ

Ефективне планування ресурсів та оптимізація графіку робіт дозволяє мінімізувати витрати і дотримуватися термінів виконання проекту, що забезпечує якість результатів. Багато реальних проектів включають складні взаємозалежності та обмеження, що можуть бути описані нелінійними моделями, ускладнюючи процес їх оптимізації. Використання загального алгоритму лінеаризації для нелінійних задач оптимізації пропонує інноваційний підхід до спрощення і розв'язання складних задач планування. Лінеаризація дозволяє перетворити нелінійні моделі на більш зручні для обчислення лінійні форми, що полегшує застосування методів лінійного програмування. Це особливо важливо в умовах обмежених ресурсів та строгих обмежень на час і бюджет проекту. Якщо проект має складний графік з багатьма взаємозалежними задачами, а також обмеженими ресурсами, вважаємо, що вихідна модель містить нелінійні обмеження, наприклад, залежності між різними задачами, що впливають на тривалість та використання ресурсів. Використовуючи методи лінеаризації, такі як заміна нелінійних обмежень лінійними наближеннями або використання часткових похідних для локальної лінеаризації, можна спростити задачу до лінійної форми. Після лінеаризації застосовують лінійні методи оптимізації, такі як лінійне програмування, для визначення оптимального розподілу ресурсів і графіку виконання задач. Одним із найпоширеніших прикладів використання дробово-лінійної оптимізації в управлінні проектами є задача мінімізації витрат на одиницю часу або ресурсу при максимальному підвищенні якості виконання задач. Наприклад, при плануванні будівельного проекту менеджери можуть використовувати дробові лінійні моделі для оптимізації витрат на будівельні матеріали та робочу силу, забезпечуючи при цьому високу якість робіт і гарне виконання віх графіка.

Ключові слова: дробово-лінійна оптимізація, управління проектами, ресурси, алгоритм лінеаризації, управління ризиками.

Liub. CHERNOVA, S. TITOV, I. ZHURAVEL, Liud. CHERNOVA

APPLICATION OF THE GENERAL ALGORITHM OF LINEARIZATION IN LINEAR FRACTIONAL OPTIMIZATION PROBLEMS IN PROJECT MANAGEMENT

Effective planning of resources and optimization of the work schedule allows you to minimize costs and adhere to project deadlines, which ensures the quality of results. Many real projects include complex interdependencies and constraints that can be described by nonlinear models, complicating the process of their optimization. The use of a general linearization algorithm for nonlinear optimization problems offers an innovative approach to simplifying and solving complex planning problems. Linearization makes it possible to transform non-linear models into linear forms that are more convenient for calculation, which facilitates the application of linear programming methods. This is especially important in conditions of limited resources and strict constraints on the time and budget of the project. If the project has a complex schedule with many interdependent tasks, as well as limited resources, we believe that the original model contains nonlinear constraints, for example, dependencies between different tasks that affect the duration and use of resources. Using linearization techniques, such as replacing nonlinear constraints with linear approximations or using partial derivatives for local linearization, the problem can be simplified to a linear form. After linearization, linear optimization methods, such as linear programming, are used to determine the optimal resource allocation and task execution schedule. One of the most common examples of using the linear fractional optimization in project management is given by a problem of minimizing the expense per a unit of time or resource while maximizing the tasks completion quality. For example, in planning of a construction project, managers can use linear fractional models for optimizing the expense for construction materials and manpower with ensuring a high quality of works and good meeting of the schedule milestones at the same time.

Keywords: linear fractional optimization, project management, resources, linearization algorithm, risk management.

Вступ. У сучасному світі, що стрімко розвивається, інформаційні технології стають фундаментом для вирішення складних задач в різних галузях науки та промисловості. Однією з таких важливих областей є оптимізація, яка надає можливість знаходити найкращі рішення для досягнення бажаних результатів при мінімізації витрат або максимізації ефективності.

Задачі дробово-лінійної оптимізації виникають у багатьох реальних ситуаціях, коли необхідно оптимізувати співвідношення між кількома параметрами. Наприклад, це може бути задача мінімізації собівартості продукції при збереженні певного рівня якості або максимізації прибутку при обмежених ресурсах. Такі задачі часто мають нелінійну природу, що ускладнює їх розв'язання за допомогою традиційних методів лінійного програмування. Тому одним із важливих напрямків дослідження є лінеаризація таких задач, яка дозволяє застосувати ефективні алгоритми лінійної оптимізації.

Дробово-лінійна оптимізація в управлінні проектами є одним із найефективніших підходів для

вирішення складних завдань, пов'язаних із плануванням, розподілом ресурсів та управлінням ризиками. Цей метод дозволяє оптимізувати співвідношення між кількома важливими параметрами проекту, такими як вартість, час, якість виконання та інші показники, що мають вирішальне значення для успішного завершення проекту.

Мета роботи. Дробово-лінійна оптимізація відрізняється від традиційних методів тим, що цільова функція в таких задачах має вигляд дробу, де чисельник і знаменник є лінійними функціями. Наприклад, це може бути співвідношення витрат до кількості виконаних робіт або часу виконання проекту до рівня його якості.

Метою роботи є дослідити задачі такого типу, що часто виникають у реальному житті, особливо в управлінні проектами, і знайти оптимальне співвідношення між різними ресурсами та результатами.

Використовуючи дробово-лінійну оптимізацію, можна мінімізувати витрати на одиницю

©, Лб. С. Чернова, С. Д. Титов, І. А. Журавель, Лд. С. Чернова, 2024

продуктивності або збільшити продуктивність при обмеженому бюджеті, що є ключовим для успішного завершення проєкту.

Вклад основного матеріалу. Одним з найпоширеніших прикладів застосування дробово-лінійної оптимізації в управлінні проєктами є задача мінімізації витрат на одиницю часу або ресурсу при максимізації якості виконання завдань.

Оскільки дробово-лінійні задачі складно розв'язувати за допомогою традиційних методів оптимізації, їх часто лінеаризують, тобто перетворюють у лінійну форму. Це досягається шляхом введення нових змінних, які дозволяють звести дробову функцію до лінійної, після чого застосовуються стандартні методи лінійного програмування, такі як симплекс-метод.

Дробово-лінійна оптимізація також знаходить застосування у ризик-менеджменті. У проєктному управлінні ризику часто вимірюються у вигляді добутку ймовірності певної події до її наслідків. За допомогою дробово-лінійної оптимізації можна мінімізувати потенційні втрати, одночасно максимізуючи ефективність заходів з управління ризиками.

Переваги дробово-лінійної оптимізації включають можливість врахування складних взаємозв'язків між різними параметрами проєкту, що дозволяє отримувати більш точні та збалансовані рішення. Вона також надає гнучкість у прийнятті рішень, оскільки менеджери можуть моделювати різні сценарії розвитку подій та вибирати найоптимальніший шлях.

Однак, слід зазначити, що дробово-лінійна оптимізація є складнішою з обчислювальної точки зору. Вона потребує значних ресурсів для розв'язання та може вимагати спеціалізованих алгоритмів і програмного забезпечення. Це становить певний виклик для її застосування в реальних проєктах, особливо у випадках з великою кількістю змінних та обмежень.

В математичних моделях задач оптимізації мішаного управління проєктами часто використовуються нелінійні цільові функції вигляду:

$$W_I = \frac{P_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{Q_1(x_1, x_2, \dots, x_n)} = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j}$$

де

$$x_j \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$c_j, d_j - \text{const}, \quad \sum_{j=1}^n d_j x_j \neq 0.$$

Аналогічні нелінійні цільові функції також застосовують для математичних моделей економічного напрямку:

Цільова функція моделі оптимізації рентабельності витрат на виробництво продукції:

$$W_I = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \rightarrow \max,$$

де x_j – кількість, запланованої до випуску продукції,

c_j – прибуток, від реалізації одиниці продукції x_j ,

d_j – собівартість, виробництва одиниці продукції x_j .

Цільова функція моделі оптимізації рентабельності продажу продукції:

$$W_I = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \rightarrow \max,$$

де x_j – кількість, запланованої до продажу продукції,

c_j – прибуток, від реалізації одиниці продукції x_j ,

d_j – ціна, одиниці продукції x_j .

Цільова функція моделі оптимізації затрат з розрахунку на одну грошову одиницю товарної продукції:

$$W_I = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \rightarrow \min,$$

де x_j – кількість, запланованої до продажу продукції,

c_j – собівартість виробництва одиниці продукції x_j ,

d_j – ціна, одиниці продукції x_j .

Цільова функція моделі оптимізації собівартості випуску продукції:

$$W_I = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{\sum_{j=1}^n x_j} \rightarrow \min,$$

де x_j – кількість, випущеної продукції,

d_j – ціна, одиниці продукції x_j .

З огляду на це, важливим є лінеаризація цільових функцій моделей, з метою зведення математичної моделі до задачі лінійної оптимізації.

Відомо, що дробово-лінійною задачею оптимізації називають таку задачу оптимізації, в якій цільова функція є дробово-лінійною функцією, а система обмежень відповідає умовам лінійності, тобто є лінійними рівняннями або нерівностями.

Загальна задача дробово - лінійної оптимізації має наступний вигляд:

$$W_I = \frac{P_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{Q_1(x_1, x_2, \dots, x_n)} = \frac{\sum_{j=1}^n c_j x_j}{\sum_{j=1}^n d_j x_j} \rightarrow \text{opt}(\max, \min)$$

$$\Omega_1: \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m, \end{cases} \quad (1)$$

$$x_j \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$c_j, d_j, b_i, a_{ij} - \text{const}, \quad \sum_{j=1}^n d_j x_j \neq 0.$$

Задачу дробово - лінійної оптимізації зведемо до розв'язку задачі лінійної оптимізації.

Позначимо $z_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_j x_j}$, та введемо нові змінні:
 $z_j = z_0 x_j, j = 1, 2, \dots, n$.

Задача (1) приймає вигляд:

$$W_{Iz} = \sum_{j=1}^n c_j z_j \rightarrow \text{opt}(max, min),$$

$$\Omega_{Iz}: \begin{cases} a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + \dots + a_{1n}z_n - b_1z_0 = 0, \\ a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + \dots + a_{2n}z_n - b_2z_0 = 0, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}z_1 + a_{m2}z_2 + \dots + a_{mn}z_n - b_mz_0 = 0, \\ d_1z_1 + d_2z_2 + \dots + d_nz_n = 1, \end{cases} \quad (2)$$

$$z_j \geq 0, z_0 > 0, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n.$$

Додаткова задача (2) є сукупністю двох задач. Перша задача є задачею лінійної оптимізації, тому розв'язується симплекс-методом, а потім знаходять розв'язок вихідної задачі дробово-лінійної оптимізації. Друга задача, пов'язана з позначенням $z_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_j x_j}$ для спрощення розв'язку задачі в цілому.

Модельний приклад № 1.

Знайти розв'язок задачі

$$W_I = \frac{2x_1 + 3x_2 - x_3}{x_1 + 2x_2 + x_3 + 3} \rightarrow \text{opt}(max)$$

$$\Omega_I: \begin{cases} x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 4, \\ -5x_1 - x_2 - 3x_3 \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0$$

Маємо задачу дробово-лінійної оптимізації. В системі обмежень перейдемо від обмежень-нерівності до обмежень-рівнянь:

$$\Omega_I: \begin{cases} x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 4, \\ -5x_1 - x_2 - 3x_3 \leq 1, \end{cases} \Rightarrow \Omega_I: \begin{cases} x_1 + 2x_2 + x_3 + x_4 = 4, \\ -5x_1 - x_2 - 3x_3 + x_5 = 1, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, 5.$$

Позначимо $z_0 = \frac{1}{x_1 + 2x_2 + x_3 + 3}$, та введемо нові змінні:

$$z_1 = z_0 x_1, z_2 = z_0 x_2, \dots, z_5 = z_0 x_5. \quad (5)$$

Цільова функція додаткової задачі (2) приймає вигляд:

$$W_{Iz} = 2z_1 + 3z_2 - z_3 \rightarrow \text{opt}(max, min).$$

Обидві частини рівнянь системи обмежень (4) помножимо на z_0 і перейдемо до нових змінних (5).

Додаткова задача (2) приймає вигляд:

$$W_{Iz} = 2z_1 + 3z_2 - z_3 \rightarrow \text{opt}(max, min)$$

$$\Omega_{Iz}: \begin{cases} -4z_0 + z_1 + 2z_2 + z_3 + z_4 = 0, \\ -z_0 - 5z_1 - z_2 - 3z_3 + z_5 = 0, \\ 3z_0 + z_1 + 2z_2 + z_3 = 1, \end{cases} \quad (6)$$

$$z_j \geq 0, z_0 > 0, j = 1, 2, \dots, 5.$$

Відомо, що для початку розв'язку задачі лінійної оптимізації симплекс-методом необхідно отримати первісний опорний план Z_0 . Для його знаходження використовуємо метод повного виключення Жордано-Гаусса. (Таблиця 1).

Таблиця 1 – Розрахунок за методом повного виключення Ж.-Гаусса

z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	b	Σ
-4	1	2	1	1	0	0	1
-1	-5	-1	-3	0	1	0	-9
3	1	2	1	0	0	1	8
W_{Iz}	0	2	3	-1	0	0	0

-7	0	0	0	1	0	-1	-7
8	-2	5	0	0	1	3	15
3	1	2	1	0	0	1	8
W_{Iz}	3	3	5	0	0	0	1

Маємо $z_0 = [0, 0, 0, 8, -7, 15]$.

В таблиці 2 наведено симплекс-розрахунок додаткової задачі (6).

Таблиця 2 – Симплекс-розрахунок задачі (6)

Basis	C	B	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
			3	3	0	0	0	0

a_4	0	-1	-7	0	0	0	1	0
a_5	0	3	8	-2	5	0	0	1
a_3	0	1	3	1	2	1	0	0
Δ_j	$W_I(Z_0) = -1$		-3	-3	0	0	0	0

a_0	3	1/7	1	0	0	0	-1/7	0
a_5	0	13/7	0	-2	5	0	8/7	1
a_3	0	4/7	0	1	2	1	3/7	0
Δ_j	$W_I(Z_1) = -4/7$		0	-3	0	0	-3/7	0

a_0	3	1/7	1	0	0	0	-1/7	0
a_5	0	3	0	0	9	2	2	1
a_1	3	4/7	0	1	2	1	3/7	0
Δ_j	$W_I(Z_2) = 8/7$		0	0	6	3	6/7	0

Оптимальний розв'язок додаткової задачі (6) рівний:

$$z_{opt} = z_2 = \left[\frac{1}{7}, \frac{4}{7}, 0, 0, 0, 3 \right],$$

тоді

$$x_1^{opt} = \frac{z_1^{opt}}{z_0 \cdot \frac{1}{7}}, \quad x_2^{opt} = \frac{z_2^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{7}} = 0,$$

$$x_3^{opt} = \frac{z_3^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{7}} = 0, \quad x_4^{opt} = \frac{z_4^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{7}} = 0,$$

$$x_5^{opt} = \frac{z_5^{opt}}{z_0} = \frac{3}{\frac{1}{7}} = 21.$$

Для отримання розв'язку задачі на мінімум зауважимо, що поточний план Z_1 розв'язку задачі симплекс-методом на максимум (Таблиця 2), є розв'язком задачі на мінімум, оскільки всі оцінки у симплекс таблиці є недодатними.

Остаточо маємо:

$$X_{opt}^{max} = [4,0,0], W_I^{max} = \frac{8}{7}, X_{opt}^{min} = [0,0,4], W_I^{min} = -\frac{4}{23}$$

Модельний приклад № 2.

Знайти розв'язок задачі

$$W_I = \frac{2x_1 - 3x_2 - x_3 + 3x_4}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + 1} \rightarrow opt(max, min),$$

$$\Omega_I: \begin{cases} x_1 - x_2 + 3x_3 + 4x_4 \leq 5, \\ 2x_1 + 4x_2 - 5x_3 - x_4 \leq 1, \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Маємо задачу дробово-лінійної оптимізації. В системі обмежень перейдемо від обмежень-нерівності до обмежень-рівнянь:

$$\Omega_I: \begin{cases} x_1 - x_2 + 3x_3 + 4x_4 \leq 5, \\ 2x_1 + 4x_2 - 5x_3 - x_4 \leq 1, \\ x_j \geq 0, j=1,2,\dots,6. \end{cases} \Rightarrow \Omega_I: \begin{cases} x_1 - x_2 + 3x_3 + 4x_4 + x_5 = 5, \\ 2x_1 + 4x_2 - 5x_3 - x_4 + x_6 = 1, \\ x_j \geq 0, j=1,2,\dots,6. \end{cases}$$

Позначимо $z_0 = \frac{1}{x_1+x_2+x_3+x_4+1}$, та введемо нові змінні:

$$z_1 = z_0x_1, z_2 = z_0x_2, \dots, z_5 = z_0x_5, z_6 = z_0x_6 \quad (9)$$

В такому разі цільова функція додаткової задачі (2) приймає вигляд:

$$W_{Iz} = 2z_1 - 3z_2 - z_3 + 3z_4 \rightarrow opt(max, min).$$

Обидві частини рівнянь системи обмежень (4) помножимо на z_0 і перейдемо до нових змінних (5).

Додаткова задача (2) приймає вигляд:

$$W_{Iz} = 2z_1 + 3z_2 - z_3 + 3z_4 \rightarrow opt(max, min)$$

$$\Omega_{Iz}: \begin{cases} -5z_0 + z_1 - z_2 + 3z_3 + 4z_4 + z_5 = 0, \\ -z_0 + 2z_1 + 4z_2 - 5z_3 - z_4 + z_6 = 0, \\ z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = 1, \\ z_j \geq 0, z_0 > 0, j = 1,2, \dots, 6. \end{cases} \quad (10)$$

Відомо, що для початку розв'язку задачі лінійної оптимізації симплекс-методом необхідно отримати первісний опорний план z_0 . Для його знаходження використовуємо метод повного виключення Жордано-Гаусса. (Таблиця 3).

Таблиця 3 – Розрахунок за методом повного виключення Ж-Гаусса

	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	b	Σ
	-5	1	-1	3	4	1	0	0	3
	-1	2	4	-5	-1	0	1	0	0
	1	1	1	1	1	0	0	1	6
W_{Iz}	0	2	-3	-1	3	0	0	0	
	-8	-2	-4	0	1	1	0	-3	-15
	4	7	9	0	4	0	1	5	30
	1	1	1	1	1	0	0	1	6
W_{Iz}	1	3	-2	0	4	0	0	1	

Маємо $z_0 = [0, 0, 0, 1, 0, -3, 5]$.

В таблиці 4 наведено симплекс-розрахунок додаткової задачі (6) на максимум.

Оптимальний розв'язок додаткової задачі (6) рівний:

$$z_{opt} = z_2 = \left[\frac{4}{9}, 0, 0, 0, \frac{5}{9}, 0, 1 \right],$$

тоді

$$x_1^{opt} = \frac{z_1^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{4}{9}} = 0, x_2^{opt} = \frac{z_2^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{4}{9}} = 0,$$

$$x_3^{opt} = \frac{z_3^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{4}{9}} = 0, x_4^{opt} = \frac{z_4^{opt}}{z_0} = \frac{\frac{5}{9}}{\frac{4}{9}} = \frac{5}{4},$$

$$x_5^{opt} = \frac{z_5^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{4}{9}} = 0, x_6^{opt} = \frac{z_6^{opt}}{z_0} = \frac{0.1}{\frac{4}{9}} = \frac{9}{4}.$$

Таблиця 4 – Симплекс-розрахунок задачі (6) на максимум

Basis	C	B	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	3	-2	0	4	0	0
a_5	0	-3	-8	-2	-4	0	1	1	0
a_6	0	5	4	7	9	0	4	0	1
a_3	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Δ_j	$W_I(Z_0)=-1$		-1	-3	2	0	-4	0	0
a_0	1	3/8	1	1/4	1/2	0	-1/8	-1/8	0
a_6	0	7/2	0	6	7	0	9/2	1/2	1
a_3	0	5/8	0	3/4	1/2	1	9/8	1/8	0
Δ_j	$W_I(Z_1)=-5/8$		0	-11/4	5/2	0	-33/8	-1/8	0
a_0	1	4/9	1	1/3	5/9	1/9	0	-1/9	0
a_6	0	1	0	3	5	-4	0	0	1
a_4	4	5/9	0	2/3	4/9	8/9	1	1/9	0
Δ_j	$W_I(Z_2)=5/3$		0	0	13/3	11/3	0	1/3	0

В таблиці 5 наведено симплекс-розрахунок додаткової задачі (6) на мінімум.

Таблиця 5 – Симплекс-розрахунок задачі (6) на мінімум

Basis	C	B	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	3	-2	0	4	0	0
a_5	0	-3	-8	-2	-4	0	1	1	0
a_6	0	5	4	7	9	0	4	0	1
a_3	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Δ_j	$W_I(Z_0)=-1$		-1	-3	2	0	-4	0	0
a_0	1	3/8	1	1/4	1/2	0	-1/8	-1/8	0
a_6	0	7/2	0	6	7	0	9/2	1/2	1
a_3	0	5/8	0	3/4	1/2	1	9/8	1/8	0
Δ_j	$W_I(Z_1)=-5/8$		0	-11/4	5/2	0	-33/8	-1/8	0
a_0	1	1/8	1	-5/28	0	0	-25/56	-9/56	-1/14
a_2	-2	1/2	0	6/7	1	0	9/14	1/14	1/7
a_3	0	3/8	0	9/28	0	1	45/56	5/56	-1/14
Δ_j	$W_I(Z_2)=-15/8$		0	-137/28	0	0	-321/56	-17/56	-5/14

Оптимальний розв'язок додаткової задачі (6) на мінімум рівний:

$$z_{min} = z_2 = \left[\frac{1}{8}, 0, \frac{1}{2}, \frac{3}{8}, 0, 0, 0 \right],$$

тоді

$$x_1^{opt} = \frac{z_1^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{8}} = 0, x_2^{opt} = \frac{z_2^{opt}}{z_0} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{8}} = 4,$$

$$x_3^{opt} = \frac{z_3^{opt}}{z_0} = \frac{\frac{3}{8}}{\frac{1}{8}} = 3, x_4^{opt} = \frac{z_4^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{8}} = 0, x_5^{opt} =$$

$$\frac{z_5^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{8}} = 0, x_6^{opt} = \frac{z_6^{opt}}{z_0} = \frac{0}{\frac{1}{8}} = 0$$

$$\text{Маємо: } X_{opt}^{max} = \left[0, 0, 0, \frac{5}{4} \right], W_I^{max} = \frac{5}{3},$$

$$X_{opt}^{min} = [0, 4, 3, 0], W_1^{min} = -\frac{15}{8}.$$

У двовимірному випадку задачу дробово-лінійної оптимізації можливо розв'язати графічно та виконати графічну інтерпретацію розв'язку.

Дробово-лінійною задачею оптимізації двох змінних формують наступним чином: знайти такий план $X_{opt} = [x_1, x_2]$, який надає цільовій функції $W_1(X_{opt}) = W_1^{opt}$ оптимального значення

$$W_1 = \frac{P_2(x_1, x_2)}{Q_2(x_1, x_2)} = \frac{\sum_{j=1}^2 c_j x_j}{\sum_{j=1}^2 d_j x_j} \rightarrow opt(max, min),$$

$$\Omega_I: \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2, \\ \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 \leq b_{m,I} \end{cases} \quad (11)$$

$$x_j \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2,$$

$$c_j, d_j, b_i, a_{ij} - const, \quad \sum_{j=1}^2 d_j x_j \neq 0$$

Розглядаємо розв'язок та геометричну інтерпретацію розв'язку задачі з двома змінними. Можливі два випадки:

Цільова функція задачі є однорідною функцією вигляду:

$$W_1 = \frac{P_2(x_1, x_2)}{Q_2(x_1, x_2)} = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{d_1 x_1 + d_2 x_2} \rightarrow opt(max, min) \quad (12)$$

Цільова функція задачі є неоднорідною функцією вигляду:

$$W_1 = \frac{P_2(x_1, x_2)}{Q_2(x_1, x_2)} = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_0}{d_1 x_1 + d_2 x_2 + d_0} \rightarrow opt(max, min) \quad (13)$$

Спочатку розглянемо випадок коли цільова функція задачі є однорідною функцією (12). Відомо, що розв'язок системи обмежень Ω_I задачі (11) є опукла множина, обмежена прямими лініями, яку також називають поліедром. У загальному випадку Ω_I геометрично зображують як багатокутник (Рис. 1)

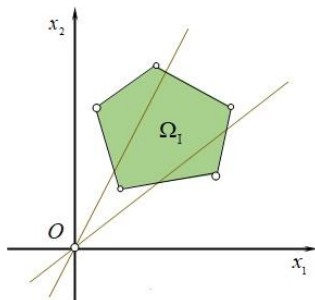


Рис. 1. Графічний метод розв'язку задачі (11)

Щоб надати геометричну інтерпретацію поведінки цільової функції (12), розв'яжемо це рівняння відносно x_2 :

$$(W_1 d_1 x_1 + W_1 d_2 x_2 = c_1 x_1 + c_2 x_2,$$

$$(W_1 d_2 - c_2) x_2 = c_1 - (W_1 d_1) x_1,$$

$$x_2 = \frac{c_1 - W_1 d_1}{W_1 d_2 - c_2} x_1.$$

Введемо позначення

$$k_{12} = \frac{c_1 - W_1 d_1}{W_1 d_2 - c_2},$$

тоді дістанемо рівняння прямої ω

$$\omega: x_2 = k_{12} x_1,$$

яка проходить через початок координат O .

Надаючи різних значень цільовій функції W_1 , отримаємо пучок прямих з центром в точці O початку координат. Сутність геометричного розв'язку двовимірної задачі дробово-лінійної оптимізації полягає в знаходженні такої прямої, яка відповідає оптимальному значенню W_1 , і водночас належить поліедру Ω_I . Такою прямою, яку прийнято називати опорною (Рис.2), буде пряма, котра торкається вершини Ω_I або проходить через сторону поліедра, що відповідає випадку альтернативного мінімуму, (Рис. 3)

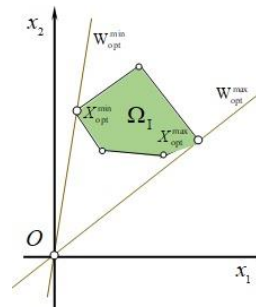


Рис.2

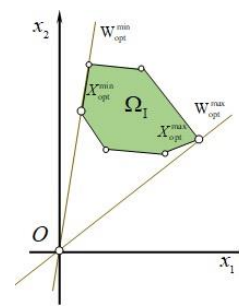


Рис.3

Координати вершин, через які проходить опорна пряма, й дають оптимальні плани розв'язку задачі. В залежності в двовимірній системі обмежень, можливі наступні випадки: (Рис. 4, 5, 6, 7).

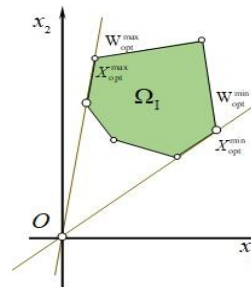


Рис.4

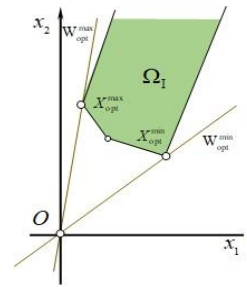


Рис.5

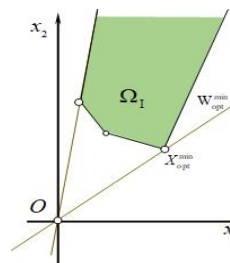


Рис.6

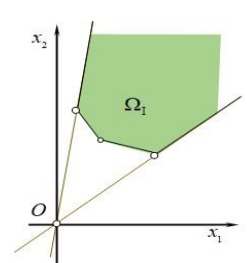


Рис.7

Область припустимих значень Ω_I обмежена, існують два альтернативних оптимуму, які набуваються в точках двох сторін поліедру Ω_I . (Рис. 4)

Область припустимих значень Ω_1 необмежена, існують дві кутові вершини, які надають цільовій функції оптимальних значень. (Рис. 5)

Область припустимих значень Ω_1 необмежена, існує тільки одна кутова вершини, яка надає цільовій функції оптимального(мінімум) значення. Другий оптимум (максимум) відповідає випадку асимптотичного максимуму. (Рис. 6).

Область припустимих значень Ω_1 необмежена. Оптимуми є асимптотичними. (Рис. 7).

Розглянемо приклади геометричного розв'язку задач дробово-лінійної оптимізації у разі однорідної цільової функції.

Модельний приклад № 3.

Розв'язати задачу оптимізації:

$$W_I = \frac{2x_1 - 3x_2}{x_1 + 5x_2} \rightarrow \text{opt}(max, min),$$

$$\Omega_1: \begin{cases} -6x_1 + 11x_2 \leq 60 \\ 2x_1 - x_2 \leq 12 \\ 2x_1 + 3x_2 \geq 20 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Будуємо поліедр Ω_1 . (Рис. 8) Зобразивши пряму $x_1 + 5x_2 = 0$, пересвідчуємось в тому, що вона не перетинає поліедр, тобто знаменник цільової функції не приймає нульових значень на припустимій множині Ω_1 .

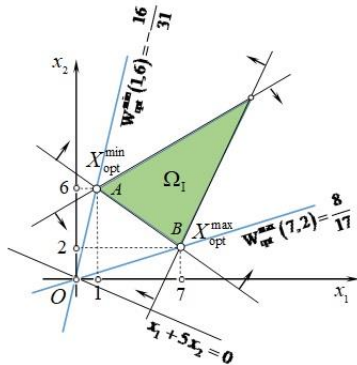


Рис.8. Графічний метод розв'язку

Оскільки цільова функція задачі є однорідною функцією, то через початок координат проводимо дві опорні прямі до поліедру Ω_1 . Обчислюємо координати опорних вершин A та B:

$$A: \begin{cases} -6x_1 + 11x_2 = 60, \\ 2x_1 + 3x_2 = 20, \end{cases} \Leftrightarrow A(1,6)$$

$$B: \begin{cases} 2x_1 - x_2 = 12, \\ 2x_1 + 3x_2 = 20, \end{cases} \Leftrightarrow B(7,2)$$

Обчислюємо значення цільової функції в цих точках:

$$W_I(1,6) = \frac{2 \cdot 1 - 3 \cdot 6}{1 + 5 \cdot 6} = -\frac{16}{31},$$

$$W_I(7,2) = \frac{2 \cdot 7 - 3 \cdot 2}{7 + 5 \cdot 2} = \frac{8}{17},$$

Маємо:

$$X_{opt}^{min}(1,6), W_{opt}^{min}(1,6) = -\frac{16}{31},$$

$$X_{opt}^{max}(7,2), W_{opt}^{max}(7,2) = \frac{8}{17}.$$

Модельний приклад № 4.

Розв'язати задачу дробово-лінійної оптимізації:

$$W_I = \frac{x_1 - 2x_2}{3x_1 + x_2} \rightarrow \text{opt}(max, min)$$

$$\Omega_1: \begin{cases} 5x_1 + 4x_2 \geq 33, \\ -2x_1 + 3x_2 \leq 19, \\ 3x_1 + 2x_2 \leq 43, \\ 5x_1 - x_2 \leq 37, \\ x_1 - 3x_2 \leq -1, \end{cases}$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

Будуємо поліедр Ω_1 . (Рис. 9) Зображивши пряму $3x_1 + x_2 = 0$, пересвідчуємось в тому, що вона не перетинає поліедр, тобто знаменник цільової функції не приймає нульових значень на припустимій множині Ω_1 .

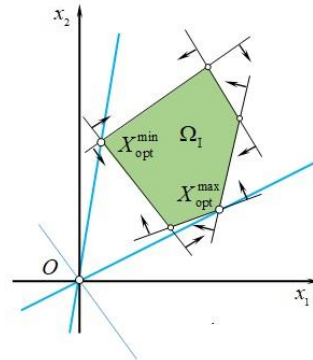


Рис.9. Графічний метод розв'язку

Цільова функція задачі є однорідною функцією, тому через початок координат проводимо дві опорні прямі до поліедру Ω_1 . Обчислюємо координати опорних вершин:

$$\begin{cases} 5x_1 + 4x_2 = 33, \\ -2x_1 + 3x_2 = 19, \end{cases} \Leftrightarrow X_1(1,7),$$

$$\begin{cases} 5x_1 - x_2 = 37, \\ x_1 - 3x_2 = -1, \end{cases} \Leftrightarrow X_2(8,3)$$

Обчислюємо значення цільової функції в цих точках:

$$W_I(1,7) = \frac{1 - 2 \cdot 7}{3 \cdot 1 + 7} = -\frac{13}{10},$$

$$W_I(8,3) = \frac{8 - 2 \cdot 3}{3 \cdot 8 + 3} = \frac{2}{27}.$$

Маємо:

$$X_{opt}^{min}(1,7), W_{opt}^{min}(1,7) = -\frac{13}{10},$$

$$X_{opt}^{max}(8,3), W_{opt}^{max}(8,3) = \frac{2}{27}.$$

Якщо цільова функція є неоднорідною, то розв'яжемо це рівняння відносно x_2 , дістанемо:

$$W_1 d_1 x_1 + W_1 d_2 x_2 + W_1 d_0 = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_0,$$

$$(W_1 d_2 - c_2) x_2 = (c_1 - W_1 d_1) x_1 + (c_0 - W_1 d_0),$$

$$x_2 = \frac{c_1 - W_1 d_1}{W_1 d_2 - c_2} x_1 + \frac{c_0 - W_1 d_0}{W_1 d_2 - c_2}.$$

Введемо позначення

$$k = \frac{c_1 - W_1 d_1}{W_1 d_2 - c_2}, b = \frac{c_0 - W_1 d_0}{W_1 d_2 - c_2},$$

отримаємо рівняння:

$$x_2 = kx_1 + b.$$

Ця пряма вже не проходить через початок координат, як у випадку однорідної функції. Випадок неоднорідної цільової функції можливо звести до однорідної функції перетворенням системи координат вигляду:

$$\begin{cases} x_1 = x_{01} + \alpha, \\ x_2 = x_{02} + \beta. \end{cases}$$

Цільова функція для неоднорідної функції приймає вигляд:

$$W_1 = \frac{c_1(x_{01} + \alpha) + c_2(x_{02} + \beta) + c_0}{d_1(x_{01} + \alpha) + d_2(x_{02} + \beta) + d_0} = \frac{c_1\alpha + c_2\beta + (c_1x_{01} + c_2x_{02} + c_0)}{d_1\alpha + d_2\beta + (d_1x_{01} + d_2x_{02} + d_0)}.$$

Якщо дібрати x_{01} та x_{02} такими, щоб вирази у дужках були рівні нулю

$$\begin{cases} c_1x_{01} + c_2x_{02} + c_0 = 0, \\ d_1x_{01} + d_2x_{02} + d_0 = 0, \end{cases}$$

То цільова функція стане однорідною

$$W_1 = \frac{c_1x_1 + c_2x_2 + c_0}{d_1x_1 + d_2x_2 + d_0} \rightarrow \frac{c_1\alpha + c_2\beta}{d_1\alpha + d_2\beta}$$

в новій системі координат $O_n\alpha\beta$ початок, якої знаходиться в точці $O_n(x_{01}, x_{02})$. Прямі лінії $x_2 = kx_1 + b$ пройнуть через новий початок координат O_n .

Сумарний алгоритм розв'язку для неоднорідної цільової функції $c_1x_1 + c_2x_2 + c_0$ має наступні кроки:

Побудуємо поліедр Ω_I і пряму лінію $d_1x_1 + d_2x_2 + d_0 = 0$, яка не повинна перетинати поліедр.

Розв'язуємо систему

$$\begin{cases} c_1x_{01} + c_2x_{02} + c_0 = 0 \\ d_1x_{01} + d_2x_{02} + d_0 = 0, \end{cases}$$

і знаходимо координати $O_n(x_{01}, x_{02})$ центра пучка прямих.

Через точку центра $O_n(x_{01}, x_{02})$ проводимо опорні прямі лінії до поліедра Ω_I .

Знаходимо оптимальні вершини та їх координати.

Обчислюємо значення цільової функції в цих точках та порівнюємо їх.

Модельний приклад № 5.

Розв'язати задачу дробово-лінійної оптимізації:

$$W_1 = \frac{3x_1 + 2x_2 - 6}{x_1 + x_2 - 1} \rightarrow \text{opt}(\max, \min),$$

$$\Omega_I: \begin{cases} 7x_1 + 2x_2 \geq 30, \\ -3x_1 + 4x_2 \leq 26, \\ 3x_1 + 4x_2 \leq 62, \\ 4x_1 - 3x_2 \leq 16, \\ x_1 - x_2 \leq 3, \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0. \end{cases}$$

Будуємо поліедр Ω_I . (Рис. 10).

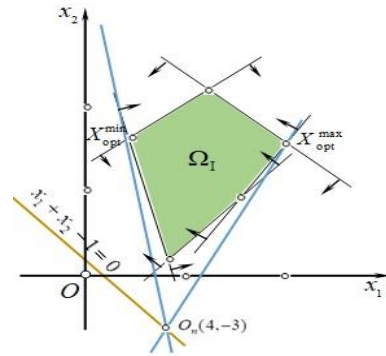


Рис.10. Графічний метод розв'язку

Визначаємо координати центра пучка прямих з розв'язку системи:

$$\begin{cases} 3x_{01} + 2x_{02} - 6 = 0, \\ x_{01} + x_{02} - 1 = 0, \end{cases} \Leftrightarrow O_n(x_{01}, x_{02}) \Leftrightarrow O_n(4, -3).$$

З точки центра пучка $O_n(4, -3)$ проводимо опорні прямі лінії до поліедра Ω_I . Знаходимо координати опорних вершин поліедра:

$$\begin{cases} 7x_1 + 2x_2 = 30, \\ -3x_1 + 4x_2 = 26, \end{cases} \Leftrightarrow (2,8),$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 4x_2 = 62, \\ 4x_1 - 3x_2 = 16, \end{cases} \Leftrightarrow (10,8).$$

Обчислюємо значення цільової функції в цих точках:

$$W_1(2,8) = \frac{16}{9},$$

$$W_1(10,8) = \frac{40}{17},$$

та порівнюючи ці значення, здобуваємо відповідь.

Маємо:

$$X_{opt}^{min}(2,8), W_{opt}^{min}(2,8) = \frac{16}{9},$$

$$X_{opt}^{max}(10,8), W_{opt}^{max}(10,8) = \frac{40}{17}.$$

Висновки. Дробово-лінійна оптимізація є потужним інструментом у сфері управління проектами, особливо коли йдеться про оптимізацію складних співвідношень між витратами, часом та якістю. Вона дозволяє досягати високих результатів у проектному управлінні, забезпечуючи ефективний розподіл ресурсів та мінімізацію ризиків. Незважаючи на складність, цей метод має великий потенціал для подальшого розвитку і широкого застосування у практиці управління проектами.

Список літератури

1. Goyer O. Modern view of project management problems. *Actual problems of international relations*. 2012. Issue 111(2), pp. 125–135. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/apmv_2012_111\(2\)_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/apmv_2012_111(2)_17).
2. Oghirko O., Krap-Spisak N. Information technology of project management. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Computer Science and Information Technology*. 2016. No. 843, pp. 57–64. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPKNIT_2016_843_10.
3. Pandian P., Natarajan. A new method for finding an optimal solution for transportation problems. *International Journal of Mathematical Sciences and Engineering Applications*. 2010. 4(2), pp. 59–65.
4. Rodashchuk G., Kontseba S., Lischuk R., Skurtol S. Network planning in IT project management. *Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*. 2023. No. 1, pp. 42–56.
5. Tripathi M., Kumar A. Systematic literature review of software project management performance measurement. *Journal of Software Engineering Research and Development*. 2019. No. 7(1).
6. Smetaniuk O., Bondarchuk A. Peculiarities of the project management system in IT companies. *Agrosvit*. 2020. URL: <http://www.agrosvit.info/index.php?op=1&z=3205&i=14>.
7. Bushuyev S., Ivko A. Construction of models and application of syncretic innovation project management in the era of artificial intelligence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 3(3(129)), pp. 44–54.
8. Bushuyev S., Ivko A. Values Spiral Development Method in the Implementation of Digitalization Projects in Syncretic Methodology. *International Journal of Computing*. 2024. 23(2), pp. 177–186.
9. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2021. Vol. 2, pp. 293–298. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.
10. Abd-Elhameed W., Ali A. New Specific and General Linearization Formulas of Some Classes of Jacobi Polynomials. *Mathematics*. 2021. 9(1), p. 74. doi: 10.3390/math9010074.
11. Hahnloser R. Learning algorithms based on linearization network. *Computation in Neural Systems*. 1998. 9(3), pp. 363–380. doi: 10.1088/0954-898X_9_3_006.
12. Ghaoui L., Oustry F., AitRami M. A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1997. Vol. 42, No. 8, pp. 1171–1176. doi: 10.1109/9.618250.

Надійшла (received) 10.11.2024

Відомості про авторів (About authors)

Чернова Любава Сергіївна (Chernova Liubava) – доктор технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій; м. Миколаїв, Україна; e-mail: 19chls92@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5191-0272>

Титов Сергій Дмитрович (Titov Sergiy) – доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, доцент кафедри вищої математики; м. Миколаїв, Україна; e-mail: ss1-ss10@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8772-9889>

Журавель Ірина Анатоліївна (Zhuravel Iryna) – Ph. D., кафедра управління проектами, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова; м. Миколаїв, Україна; e-mail: iagurav@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3747-4387>.

Чернова Людмила Сергіївна (Chernova Liudmyla) – доктор технічних наук, професор, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, професор кафедри інформаційних управляючих систем та технологій; м. Миколаїв, Україна; e-mail: 19chsk56@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0666-0742>

О. С. КРАВЧЕНКО

ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СУБМІКРОННИХ ДЕФЕКТІВ ПОВЕРХНІ ЗА ЇХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ

Розроблено автоматизований метод виявлення та класифікації субмікронних дефектів поверхні дзеркал для високоточних оптичних систем на основі аналізу інтерференційних зображень із застосуванням глибокого навчання. Запропонований підхід замінює ручний аналіз нейромережею, що забезпечує швидшу й об'єктивнішу діагностику дефектів, усуваючи вплив людського фактора та прискорюючи контроль якості в умовах серійного виробництва оптичних компонентів. Для навчання моделі створено синтетичну вибірку інтерференційних зображень, яка моделює дефекти типу подряпин на дзеркальній поверхні за допомогою спеціального програмного забезпечення, заснованого на фізичній моделі інтерферометра Лінника. Вибірка охоплює три класи поверхонь: плоскі, з однією подряпиною та з численними подряпинами. Нейромережа побудована на базі MobileNetV2 із попереднім навчанням на ImageNet, із подальшим тонким налаштуванням останніх блоків для адаптації до специфіки задачі. До архітектури включено шари GlobalAveragePooling2D для стискання ознак, Dense із функцією активації ReLU та нормалізацією BatchNormalization, Dropout для запобігання перенавчанням й вихідний шар із Softmax для класифікації трьох класів. Застосовано аугментацію даних і техніку soft voting для підвищення узагальнювальної здатності моделі. Точність класифікації оцінено за метрикою assiguasu: на синтетичних даних валідаційної вибірки вона становить 96%, на реальних зображеннях, отриманих із інтерферометра Лінника, — 82,7%. Найвища точність спостерігається для плоских поверхонь, найнижча — для численних подряпин, що відображає складність реальних умов через шуми та артефакти. Метод демонструє практичну цінність для автоматизації діагностики, а перспективи вдосконалення пов'язані з підвищенням реалістичності синтетичних даних шляхом додавання змодельованих шумів і адаптацією моделі до інших типів дефектів, таких як вм'ятини чи виступи, що розширять його застосовність у виробництві оптичних систем.

Ключові слова: субмікронні дефекти, інтерференційні зображення, глибоке навчання, нейромережа, MobileNetV2, класифікація.

О. KRAVCHENKO

DETECTION AND CLASSIFICATION OF SUBMICRON SURFACE DEFECTS BASED ON THEIR INTERFERENCE IMAGES USING DEEP LEARNING

An automated method for detecting and classifying submicron surface defects on mirrors used in high-precision optical systems has been developed, utilizing interferometric image analysis and deep learning. This approach replaces manual inspection with a neural network, delivering faster and more objective defect diagnostics, eliminating human bias, and accelerating quality control in serial production of optical components. A synthetic dataset of interferometric images was generated to train the model, simulating scratch-type defects on mirror surfaces through specialized software based on the Linnik interferometer model. The dataset encompasses three surface classes: flat surfaces, single scratches, and multiple scratches. The neural network is built upon MobileNetV2, pre-trained on ImageNet, with fine-tuning of its final blocks to adapt to the task's specifics. The architecture incorporates GlobalAveragePooling2D for feature compression, Dense layers with ReLU activation and BatchNormalization, Dropout to mitigate overfitting, and a Softmax output layer for classifying the three categories. Data augmentation and soft voting techniques were employed to enhance the model's generalization ability. Classification accuracy, assessed using the accuracy metric, achieves 96% on the synthetic validation set and 82.7% on real images acquired from a Linnik interferometer. The highest accuracy is observed for flat surfaces, while the lowest occurs for multiple scratches, highlighting challenges posed by real-world conditions such as noise and artifacts. The method proves its practical value for automated diagnostics, with future enhancements tied to improving synthetic data realism-potentially by incorporating modeled noise-and extending the model's adaptability to additional defect types like indentations or protrusions, thereby broadening its applicability in optical system manufacturing.

Keywords: submicron defects, interferometric images, deep learning, neural network, MobileNetV2, classification.

1. Вступ. Сучасні прецизійні оптичні системи, такі як телескопи, лазерні установки чи інтерферометри, значною мірою залежать від високоточних дзеркал. Ці елементи відіграють ключову роль у забезпеченні точності вимірювань, ефективності передачі світла та надійності роботи приладів. Проте навіть незначні вади на їхній поверхні, зокрема субмікронні подряпини чи вм'ятини, здатні суттєво вплинути на функціонування системи. Такі дефекти спотворюють оптичні сигнали, спричиняють локальні перегріву через концентрацію енергії та, як наслідок, скорочують термін служби дорогих компонентів.

До дзеркал у таких системах висуваються надзвичайно високі вимоги. Поверхня має не лише ідеально відповідати заданій геометрії, а й бути вільною від дефектів на мікро- та нанометровому рівні. Наприклад, у лазерних системах подряпина глибиною в десятки нанометрів може спричинити розсіювання світла, знижуючи інтенсивність корисного сигналу. В інтерферометрах подібні

дефекти порушують фазову когерентність, що унеможлиблює точні вимірювання. Таким чином, контроль якості поверхні є однією з пріоритетних задач у виробництві оптичних компонентів, а пошук ефективних методів діагностики залишається актуальною проблемою сучасної оптики [1].

Для виявлення дефектів поверхні розроблено численні підходи, серед яких особливе місце посідають оптичні методи, оскільки вони забезпечують високу чутливість до субмікронних нерівностей та не потребують прямого контакту з поверхнею. Однією із найпоширеніших є методика інтерференційної діагностики, зокрема із застосуванням інтерферометра Лінника [2]. Цей метод дає змогу візуалізувати нерівності поверхні через інтерференційні картини (ІК) — смуги, форма та розташування яких залежать від рельєфу досліджуваного об'єкта. Завдяки високій чутливості до перепадів висот у нанометровому діапазоні інтерферометрію вважають стандартом для контролю якості дзеркал у високоточних системах.

© О. С. Кравченко, 2024

Утім, традиційний підхід до аналізу інтерференційних зображень має суттєві обмеження. Зазвичай його виконують вручну: оператор вивчає отримані картини, визначає наявність дефектів і класифікує їх. Такий процес потребує значних затрат часу та значною мірою залежить від кваліфікації фахівця. Один і той самий дефект може бути інтерпретований по-різному залежно від досвіду чи навіть втоми людини. До того ж, за великої кількості зразків, що перевіряються, імовірність помилок зростає, що знижує об'єктивність і відтворюваність результатів. Ці недоліки підкреслюють потребу в автоматизації діагностики, яка здатна усунути людський фактор і прискорити процес контролю.

У цій роботі поставлено завдання розробити автоматизований метод виявлення та класифікації субмікронних дефектів поверхні на основі аналізу інтерференційних зображень із застосуванням глибокого навчання. Передбачається, що ручну працю буде замінено нейромережею, яка швидко й точно визначатиме типи дефектів — від плоских поверхонь до складних структур із численними подряпинами. Такий підхід спрямований на підвищення швидкості діагностики та забезпечення її об'єктивності, що особливо важливо для серійного виробництва оптичних компонентів.

Новизна дослідження полягає у двох ключових аспектах. По-перше, створено синтетичну вибірку інтерференційних зображень, які моделюють дефекти дзеркальних поверхонь, що дало змогу провести навчання нейромережі без необхідності залучення великого масиву реальних даних. По-друге, розроблено та випробувано нейромережевий підхід, адаптований до специфіки ІК, що вирізняє цю роботу серед традиційних методів аналізу зображень. Ці кроки відкривають нові можливості для автоматизації контролю якості та можуть стати основою для подальших досліджень у галузі оптичної дефектоскопії [3].

2. Методика

2.1. Генерація синтетичної вибірки. Одним із ключових завдань дослідження було створення синтетичної вибірки, яка забезпечує навчання нейромережі без потреби залучення тисяч реальних інтерференційних зображень. Для цього розроблено програмне забезпечення, здатне моделювати дефекти на дзеркальній поверхні та генерувати відповідні ІК. Детальний опис алгоритму виходить за межі цієї статті й буде подано в наступних публікаціях, однак основні принципи роботи програмного забезпечення коротко викладено нижче.

Процес розпочинається з формування рельєфу поверхні у вигляді карти висот у форматі .csv — квадратної матриці розміром 3000×3000 , де кожне значення відповідає висоті (координаті z) у точці з координатами (x, y) . Ця карта відображає рельєф поверхні з урахуванням заданих дефектів, таких як подряпини. Далі карта висот перетворюється на інтерференційне зображення (рис. 1) на основі фізичної моделі інтерферометра Лінника [4]. Такий

підхід дає змогу гнучко варіювати параметри й отримувати дані, максимально наближені до реальних.

Особливу увагу приділено моделюванню подряпин як найпоширеніших дефектів. Їхні характеристики визначено так: довжина варіюється від 30 до 300 мкм, ширина — від 1 до 7 мкм, глибина — від 100 до 300 нм. Крім того, профіль подряпини вздовж довжини може змінюватися, що додає різноманітності до вибірки. Параметри ІК також не є сталими: регулюються ширина й нахил смуг, а також контрастність, щоб урахувати можливі варіації умов роботи інтерферометра.

Вибірка охоплює три класи поверхонь:

- плоска поверхня (plain_surface) — ідеальний випадок без дефектів.
- поверхня з однією подряпиною (single_scratch) — одиничний дефект.
- поверхня з численними подряпинами (multi_scratch) — від 2 до 7 подряпин на зображенні.

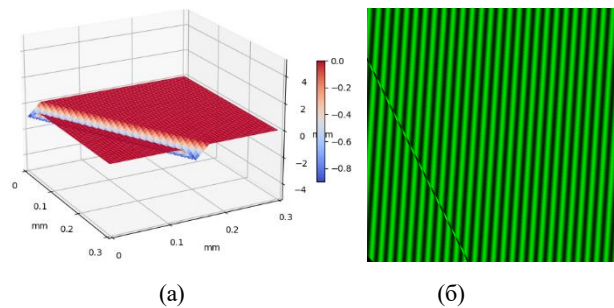


Рис. 1. Приклад 3D зображення синтетичної карти висот і інтерференційної картини для поверхні з однією подряпиною

Для кожного класу сформовано по 3000 зображень, що загалом становить 9000 прикладів для навчання [5]. Такий обсяг і різноманітність забезпечують надійну базу для підготовки нейромережі.

2.2. Архітектура нейромережі. Нейромережа приймає на вхід RGB-зображення розміром 3000×3000 пікселів, що відповідає роздільній здатності синтетичних ІК. Як базову модель обрано MobileNetV2 — легку й ефективну мережу, попередньо навчену на ImageNet [3]. Її використано з параметром `include_top=False`, щоб адаптувати вихідний шар до конкретної задачі, зберігши при цьому потужні можливості вилучення ознак.

Архітектуру побудовано наступним чином (рис. 2): початкові шари MobileNetV2 заморожені, щоб зберегти загальні знання, отримані на ImageNet, тоді як останні 2–3 блоки піддано тонкому налаштуванню (fine-tuning) із низьким значенням швидкості навчання та розкладом cosine annealing для поступової адаптації до даних [6]. Після цього застосовано шар GlobalAveragePooling2D, який стискає просторові ознаки у компактний вектор. Далі використано Dense-шар із 128 нейронами та активацією ReLU, доповнений BatchNormalization для стабілізації навчання й L2-регуляризацією (коефіцієнт 0.0001) для контролю wag. Щоб запобігти перенавчанню, додано Dropout із ймовірністю 0.5.

Нарешті, вихідний Dense-шар із 3 нейронами активацією softmax видає ймовірності належності (plain_surface, single_scratch, multi_scratch) і зображення до кожного класу [7].

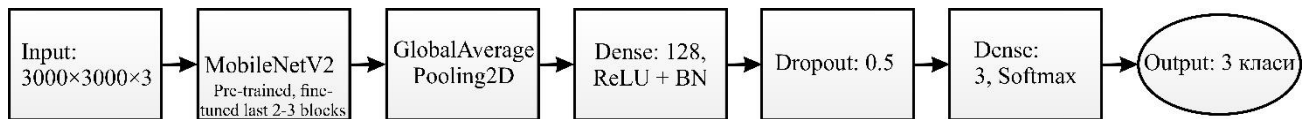


Рис. 2. Схема архітектури нейромережі для класифікації інтерференційних зображень

Для підвищення стійкості моделі застосовано аугментацію через ImageDataGenerator: обертання, зсуви, масштабування та горизонтальне відображення. Додатково впроваджено вдосконалення: техніка soft voting узагальнює передбачення за кількома аугментованими версіями одного зображення, а функція втрат categorical cross-entropy із label smoothing (коефіцієнт 0.1) пом'якшує надмірну впевненість моделі, покращуючи узагальнення.

2.3. Навчання та верифікація. Синтетичну вибірку з 9000 зображень було поділено у співвідношенні 80% на навчання (7200) і 20% на валідацію (1800), щоб відстежувати прогрес моделі [8]. Для тестування підготовлено набір реальних даних, отриманий із допомогою інтерферометра Лінника: 300 зображень (по 100 на клас). Це дало змогу оцінити ефективність моделі як на "знайомих" даних, так і в умовах реальної діагностики.

Для оцінки якості класифікації було використано метрику accuracy, яка обчислюється за формулою:

$$\text{Accuracy} = \text{TC}/\text{N}, \quad (1)$$

де TC – кількість правильно класифікованих прикладів; N – загальна кількість прикладів.

Ця метрика відображає частку правильно класифікованих зображень у загальній кількості зображень, що відповідає її стандартному визначенню в задачах класифікації. Вона є простою для інтерпретації та добре підходить для цієї задачі завдяки збалансованості класів за кількістю прикладів. Показник зручно використовувати для порівняння результатів на різних наборах даних [9].

3. Результати

3.1. Приклади інтерференційних зображень. На початковому етапі оцінки методу проведено аналіз візуальних характеристик синтетичних інтерференційних зображень, які використано для навчання та тестування нейромережі. Визначено три основні класи поверхонь: плоска поверхня (plain_surface), поверхня з однією подряпиною (single_scratch) і поверхня з численними подряпинами (multi_scratch). Для кожного класу підготовлено типові приклади, щоб продемонструвати, як дефекти виявляються в інтерференційних картинах.

На рис. 3(а) зображено плоску поверхню: рівномірні інтерференційні смуги без викривлень свідчать про відсутність дефектів. Рис. 3(б) ілюструє випадок з однією подряпиною — смуги деформуються в зоні дефекту, утворюючи характерний злам, помітний навіть без спеціальних засобів. На рис. 3(в)

показано поверхню з декількома подряпинами. Ці візуальні особливості слугують основою для розпізнавання нейромережею, яка здатна ефективно ідентифікувати такі відмінності.

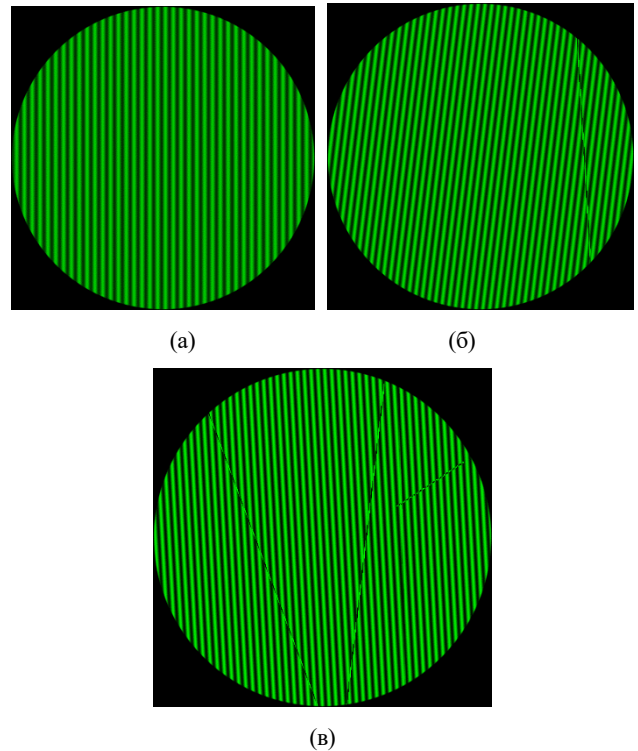


Рис. 3. Синтетичне інтерференційне зображення плоскої поверхні (plain_surface) (а), поверхні з однією подряпиною (single_scratch) (б), поверхні з численними подряпинами (multi_scratch) (в)

3.2. Точність класифікації. Кількісну оцінку роботи нейромережі проведено на двох тестових наборах: синтетичному та реальному. Синтетичну вибірку з 9000 зображень поділено на 80% для навчання (7200) і 20% для валідації (1800), і саме ці 1800 зображень (по 600 на клас) використано для оцінки точності на синтетичних даних. Результат становить 96%, що вказує на високу ефективність моделі в умовах, де зображення відповідають навчальній вибірці. На реальних даних, отриманих з інтерферометра Лінника (300 зображень, по 100 на клас), точність досягає 82,7%. Зниження точності на реальних зображеннях є передбачуваним через додаткові ускладнення, пов'язані з реальними умовами вимірювань.

Детальні показники точності для кожного класу наведено в табл. 1, з якої видно, що на синтетичних зображеннях модель демонструє стабільно високі

результати (95-97%), але на реальних даних розбіжність більша (77-88%). Такі дані свідчать, що складні дефекти (multi_scratch) є найскладнішими для класифікації в реальних умовах, ймовірно, через більшу кількість випадкових викривлень.

Таблиця 1 – Точність класифікації (accuracy) для синтетичних (валідація) і реальних інтерференційних зображень

Клас	Синтетичні дані (валідація), %	Реальні дані, %
Plain_surface	97	88
Single_scratch	96	83
Multi_scratch	95	77
Середнє	96	82,7

4. Обговорення

4.1. Аналіз результатів. Отримані результати свідчать про ефективність розробленого підходу: точність класифікації на синтетичних даних валідаційної вибірки (1800 зображень) становить 96% [10]. Цей показник підтверджує, що модель успішно виявляє та класифікує субмікронні дефекти, а синтетична вибірка достовірно відображає ключові особливості інтерференційних зображень. Такий високий рівень точності вказує на злагоджену роботу програмного забезпечення для генерації даних і архітектури нейромережі, що дає змогу чітко розрізняти плоскі поверхні, одиничні подряпини та складні випадки з численними подряпинами.

На реальних даних, отриманих з інтерферометра Лінника (300 зображень), точність знижується до 82,7%. Це зниження не є несподіваним. Реальні ІК містять додаткові ускладнення: шуми від обладнання, неоднорідність освітлення, дрібні артефакти, які важко врахувати в синтетичній моделі. Водночас показник 82,7% визнано досить переконливим, особливо з огляду на те, що навчання проводилося виключно на синтетичних даних. Це свідчить про задовільну узагальнювальну здатність моделі, хоча простір для вдосконалення зберігається.

Переваги запропонованого підходу очевидні. Процес аналізу повністю автоматизовано, що усуває залежність від людського фактора — суб'єктивні оцінки та трудомісткий ручний аналіз замінено об'єктивним машинним обробленням. Нейромережа забезпечує високу швидкість обробки зображень, що робить метод придатним для контролю якості в серійному виробництві оптичних компонентів. Завдяки аугментації даних і техніці soft voting модель виявляє стійкість до варіацій вхідних зображень, що має особливе значення для роботи в реальних умовах.

4.2. Обмеження та шляхи вдосконалення. Незважаючи на досягнуті результати, підхід має певні обмеження. Основним із них визнано розбіжності між синтетичними та реальними зображеннями, які впливають на точність класифікації. Синтетична вибірка, хоч і ретельно розроблена, не повною мірою відтворює специфіку реальних умов: шуми

обладнання, випадкові викривлення чи зміни контрастності, характерні для практичних вимірювань. Це пояснює зниження точності на реальних даних і визначає напрям для подальшого вдосконалення. Підвищення реалістичності синтетичних зображень, наприклад, шляхом додавання змодельованих шумів або випадкових артефактів, може зменшити розрив між двома наборами даних ("sim-to-real gap") [12].

Ще одна перспективна можливість пов'язана з розширенням сфери застосування методу. У поточному дослідженні основну увагу приділено подряпинам як найпоширенішим дефектам, однак дзеркальні поверхні можуть мати й інші вади: вм'ятини, виступи або комбінації різних типів дефектів. Архітектура нейромережі та підхід до генерації даних мають потенціал для адаптації до таких випадків. Додавання нових класів до синтетичної вибірки та незначна модифікація вихідного шару можуть перетворити модель на універсальний інструмент для діагностики різноманітних дефектів.

Ці обмеження розглядаються не як недоліки, а як можливості для розвитку. Запропонований метод уже зараз демонструє практичну цінність, а подальше вдосконалення синтетичних даних і налаштування моделі здатне підвищити його точність і універсальність [13].

5. Висновки. В роботі розроблено автоматизований метод класифікації субмікронних дефектів дзеркальних поверхонь на основі синтетичних інтерференційних зображень і глибокого навчання. Створено інструмент, який замінює ручний аналіз нейромережею, здатною швидко й об'єктивно визначати типи дефектів. Цей підхід усуває потребу в трудомістких процесах і забезпечує стабільність результатів.

Точність класифікації оцінено на двох наборах даних: на синтетичних зображеннях валідаційної вибірки (1800 прикладів) вона становить 96%, а на реальних даних, отриманих з інтерферометра Лінника (300 зображень), — 82,7%. Ці показники свідчать про високу ефективність моделі та якість синтетичної вибірки, а також про її здатність адаптуватися до реальних умов, попри певне зниження точності.

Запропонований метод відкриває перспективи для впровадження в виробництво високоточних оптичних систем, де контроль якості поверхні має вирішальне значення. Подальше вдосконалення синтетичної вибірки, зокрема підвищення її реалістичності, а також оптимізація архітектури нейромережі можуть додатково підвищити точність на реальних даних. Розроблений підхід не лише вирішує поточну задачу, а й створює основу для майбутніх досліджень і вдосконалень у галузі оптичної дефектоскопії [14].

Список літератури

- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep learning*. Cambridge: MIT Press, 2017. 800 p.

2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015, Proceedings, Part III*. 2015. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
3. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., Andreetto M., Adam H. MobileNets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications // arXiv preprint arXiv: 1704.04861. 2017. 9 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>
4. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016. P. 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
5. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // *Communications of the ACM*. 2017. Vol. 60, No. 6. P. 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>
6. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale // *International Conference on Learning Representations (ICLR) 2021*. 2021. 22 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929>
7. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S. et al. Rethinking the inception architecture for computer vision // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016. P. 2818–2826. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
8. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // *International Conference on Learning Representations (ICLR) 2015*. 2015. 14 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
9. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A. L. DeepLab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40, No. 4. P. 834–848. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2017.2699184>
10. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol. 13, No. 4. P. 600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
11. Daghigh V., Daghigh H., Lacy T. E., Naraghi M. Review of machine learning applications for defect detection in composite materials // *Machine Learning with Applications*. 2024. Vol. 18. P. 100600 (18 pages). <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2024.100600>
12. P. Trentsios, M. Wolf, D. Gerhard. Overcoming the Sim-to-Real Gap in Autonomous Robots // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109. P. 287 - 292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.251>
13. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative adversarial nets // *Advances in Neural Information Processing Systems 27 (NIPS 2014)*. 2014. P. 2672–2680. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661>
14. Russakovsky O., Deng J., Su H. et al. ImageNet large scale visual recognition challenge // *International Journal of Computer Vision*. 2015. Vol. 115, No. 3. P. 211–252. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
15. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // *International Conference on Learning Representations (ICLR) 2015*. 2015. 15 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

Надійшла (received) 05.11.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Олександр Сергійович (Oleksandr Kravchenko) – аспірант кафедри комп’ютерної математики і аналізу даних, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна; e-mail: Oleksandr.Kravchenko@cs.khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6169-1250>.

ЗМІСТ

Бушуєв С., Пузійчук А., Бушуєва Н., Бушуєва В., Бушуєв Д. Розвиток ландшафту освіти під впливом ШІ (eng.)	3
Гринченко М. А., Роговий М., Грінченко Є. Розробка інформаційних технологій для інтелектуального планування роботи команди ІТ-проєкту на основі гнучкої методології (eng.)	9
Гринченко М. А., Шапошніков М. І. Аналіз показників ефективності діяльності закладів вищої освіти на основі оцінювання QS WORLD UNIVERSITY RANKINGS (eng.).....	16
Зюсюн В. І. Дослідження поняття похідних ризиків від розвитку зовнішнього впливу в аспекті діяльності об'єктів господарювання та їх стратегічної стабільності	27
Кондратов О. М., Северин В. П., Попазов Д. К., Любарський С. М., Нікуліна О. М. Аналіз методів обчислювального інтелекту для моделювання, ідентифікації, оптимізації систем та підтримки прийняття рішень	35
Копп А. М., Нестеренко І. С. Модель вибору інструментів штучного інтелекту для підтримки процесів розробки програмного забезпечення.....	45
Лисенко А. О., Тверда М. С. Розробка веб-застосунку для створення документації для тестувальників та оцінка його впливу на ефективність тестування в ІТ-проєктах	50
Лобач О. В., Саржевський А. І. Розробка та впровадження інформаційної системи електронного документообігу в локомотивному депо та застосування процесів управління проєктами.....	55
Лозінська А. В., Лобач О. В., Розробка інформаційної системи для вирішення задачі оренди та купівлі житла в Нідерландах з впровадженням алгоритму контекстного пошуку: персоналізований та пришвидшений підбір нерухомості.....	62
Чернова Лб. С., Титов С. Д., Журавель І. А., Чернова Лд. С. Застосування загального алгоритму лінеаризації в дробово-лінійних задачах оптимізації в управлінні проєктами.....	69
Кравченко О. С. Виявлення та класифікація субмікронних дефектів поверхні за їх інтерференційними зображеннями за допомогою глибокого навчання	77

CONTENTS

Bushuyev S., Puzichuk A., Bushuyeva N., Bushuieva V., Bushuiev D.
The evolving landscape of education under the influence of AI3

Grinchenko M., Rohovyi M., Grinchenko E.
Development of information technology for intelligent planning of the IT project team's work based on a flexible methodology9

Grinchenko M., Shaposhnikov M.
Analysis of higher education institutions' performance indicators based on QS World University Rankings Assessment16

Ziuziun V.
Exploring the concept of derivative risks arising from external influences in the context of business operations and their strategic stability27

Kondratov O., Severyn V., Popazov D., Liubarskyi S., Nikulina O.
Analysis of computational intelligence methods for modeling, identification, optimization of systems and decision support.....35

Kopp A. M. , Nesterenko I. S.
A model for selecting artificial intelligence tools to support software development processes45

Lysenko A. O., Tverda M. S.
Development of a web application for creating documentation for testers and evaluation of its impact on the effectiveness of testing in IT projects50

Lobach O., Sarzhevskiy A.
Development and implementation of an electronic document management information system in a locomotive depot and application of project management processes.....55

Lozinska A., Lobach O.
Development of the information system for solving the problem of renting and buying housing in the Netherlands with the introduction of a contextual search algorithm: personalized and accelerated selection of real estate62

Chernova Liub., Titov S., Zhuravel I., Chernova Liud.
Application of the general algorithm of linearization in linear fractional optimization problems in project management69

Kravchenko O.
Detection and classification of submicron surface defects based on their interference images using deep learning77

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СТРАТЕГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ, УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ,
ПРОГРАМАМИ ТА ПРОЕКТАМИ**

Збірник наукових праць

№ 2 (9) 2024

Науковий редактор: Кононенко І. В., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Лобач О. В., канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Лобач О. В., канд. техн. наук, доцент

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра управління проектами в інформаційних технологіях.
Тел.: (057) 707-68-24; *e-mail*: e.v.lobach@gmail.com
Сайт: pm.khpi.edu.ua

Обл.-вид № 2-24

Підп. до друку 30.12.2024 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний 80 г/м².
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік.-вид. арк. 10.
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