

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: Системний
аналіз, управління та
інформаційні технології**

№ 1 (15) 2026

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: System
analysis, control and
information technology**

No. 1 (15) 2026

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2026

Kharkiv
NTU "KhPI", 2026

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2026. — № 1 (15) 2026. — 124 с. — ISSN 2079-0023.

Видання публікує нові наукові результати в області комп'ютерних наук і системного аналізу та управління складними системами, отримані на основі сучасних прикладних математичних методів і прогресивних інформаційних технологій. Публікуються роботи, пов'язані із штучним інтелектом, аналізом великих даних, сучасними методами високопродуктивних обчислень у системах підтримки прийняття рішень, математичним і комп'ютерним моделюванням.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів та спеціалістів у галузі системного аналізу, управління, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Ідентифікатор медіа R30-01544, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.2023 № 1075.

Мова статей – українська, англійська.

Наказом МОН України № 1643 від 28 грудня 2019 року «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 18 грудня 2019 року» «Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології» внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук».

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

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

Засновник

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Головний редактор

Годлевський М. Д., д-р техн. наук, професор, директор інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна

Заступник головного редактора

Куценко О. С., д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут, Україна

Члени редакційної колегії

Гентош Л. І., канд. техн. наук, доц., Національний університет «Львівська політехніка», Україна

Дорофєєв Ю. І., д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», Україна

Євланов М. В., д-р техн. наук, проф., Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

Копп А. М., Ph. D., проф., Національний технічний університет «ХПІ», Україна

Любчик Л. М., д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», Україна

Павлов О. А., д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

Плехова Г. А., канд. техн. наук, доц., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Прохоров О. В., д-р техн. наук, проф., Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Україна

Сіденко Є. В., канд. техн. наук, доц., Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Україна

Ткачук М. В., д-р техн. наук, проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна

Чередніченко О. Ю., д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», Україна

Шаронова Н. В., д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет «ХПІ», Україна

Цибак Л., Ph. D., доц., Братиславський університет економіки та бізнесу, Словаччина

Дегелер В., Ph. D., доц., Інститут інформатики, Амстердамський університет, Нідерланди

Філіп С., Ph. D., доц., Братиславський університет економіки та бізнесу, Словаччина

Грабар Н., Ph. D., габлітований доктор, Лілльський університет, Франція

Амон Т., Ph. D., доц., Університет Париж-Сакле та Університет Сорбонни Париж-Норд, Франція

Щекотіхін К., дипломований інженер-доктор, доц., Університет Клагенфурта, Австрія

Шахбазова Ш. Н., д-р техн. наук., проф., Азербайджанський державний економічний університет, Азербайджан

Відповідальний секретар

Безменов М. І., канд. техн. наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут, Україна

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 28 квітня 2026 р.

Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : collection of scientific works / National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". — Kharkiv: NTU "KhPI" Publ., 2026. — No. 1 (15) 2026. — 124 p. — ISSN 2079-0023.

Edition publishes new scientific results in the field of computer science and systems analysis and control of complex systems, obtained on the basis of modern applied mathematical methods and advanced information technologies. Works related to artificial intelligence, big data analysis, modern methods of high-performance computing in decision support systems, control and computer modeling are published.

For scientists, university teachers, graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management, computer science and information technologies.

Media identifier R30-01544, according to the decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated 10/16/2023 No. 1075.

The language of the articles is Ukrainian and English.

By order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1643 dated December 28, 2019 "On approval of the decisions of the Certification Board of the Ministry regarding the activities of specialized academic councils dated December 18, 2019", "Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies" was included in category B of the "List of scientific professional publications of Ukraine in which the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Sciences may be published".

Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies is included in external information systems, including the scientific database Index Copernicus (Poland), the bibliographic database OCLC WorldCat (USA), is indexed by the search engines Google Scholar and Crossref; registered in the world catalog of periodicals database Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Official website of the publication: <http://samit.khpi.edu.ua/>

Founder

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Editor-in-chief

Godlevskiy M. D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Computer Sciences and Information Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Kutsenko O. S., Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of System Analysis and Information and Analytical Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine

Editorial staff members

Hentosh L. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Dorofieiev Yu. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "KhPI", Ukraine

Yevlanov M. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

Kopp A. M., Ph. D., Professor, National Technical University "KhPI", Ukraine

Lyubchik L. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "KhPI", Ukraine

Pavlov O. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "KPI", Ukraine

Pliekhova G. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine

Prokhorov O. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University "KhAI", Ukraine

Sidenko I. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukraine

Tkachuk M. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karazin Kharkiv National University, Ukraine

Cherednichenko O. Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "KhPI", Ukraine

Sharonova N. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "KhPI", Ukraine

Cibák Luboš, Ph. D., Associate Professor, Bratislava University of Economics and Management, Slovakia

Degeler Victoria, Ph. D., Associate Professor, Informatics Institute, University of Amsterdam, Netherlands

Filip Stanislav, Ph. D., Associate Professor, Bratislava University of Economics and Management, Slovakia

Grabar Natalia, Ph. D., Habilitation (HDR), University of Lille, France

Hamon Thierry, Ph. D., Associate Professor, Université Paris-Saclay & Université Sorbonne Paris Nord, France

Schekotihin Konstantin, Dipl.-Ing. Dr., Associate Professor, Institute for Artificial Intelligence and Cybersecurity, University of Klagenfurt, Austria

Shahbazova Shahnaz Nadir, Doctor of Sciences in Eng., Professor, Azerbaijan State University of Economics, Azerbaijan

Executive secretary

Bezmenov M. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of System Analysis and Information and Analytical Technologies of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI".

Protocol No. 5 of April 28, 2026.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.01

UDC 004.8, 519.85, 613.2

N. L. CHERNOVA, Candidate of Economic Sciences (PhD), Docent, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: natalia.chernova@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0073-8457>

M. R. BEZKOROVAINYI, PhD Student at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: mykyta.bezkorovainyi@cs.khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8137-2760>

AN INTELLIGENT SYSTEM FOR DISH-LEVEL DIET PLANNING BASED ON AN OPTIMIZATION MODEL

The paper addresses the problem of developing intelligent systems for personalized nutrition planning. Modern research in this field demonstrates a transition from classical formal diet models to hybrid architectures that combine two methodological paradigms: knowledge-driven and data-driven approaches. However, there is some methodological gap between them. Knowledge-driven models provide mathematical rigor and guarantee the satisfaction of nutritional and resource constraints, but they are usually limited in adaptability and personalization. In contrast, data-driven approaches, including modern generative models, demonstrate high flexibility and the ability to incorporate behavioral data, yet they do not provide formal guarantees of optimality and constraint satisfaction. This contradiction motivates the development of an integrated intelligent nutrition planning system that combines the advantages of both approaches. The objective of this study is to develop an intelligent dish-level nutrition planning system whose core is a formalized multicriteria diet optimization model. Unlike the classical diet problem, where optimization is performed over individual food products, the proposed approach models nutrition at the level of complete dishes, which improves the practical feasibility, interpretability, and usability of the resulting dietary plans. The mathematical model is formulated as a multicriteria optimization problem in which the decision variables represent the number of dish portions, while constraints reflect nutritional, energetic, logical, and temporal requirements. The proposed model is implemented within a multi-layer system architecture consisting of a data layer, an optimization core, an intelligent decision-support layer, and a user interaction layer. The optimization core ensures mathematical correctness and computes optimal solutions, whereas the intelligent layer provides adaptation, personalization, and interpretation of results. The model is further extended to a dynamic form using a rolling planning horizon, allowing the diet plan to be updated as new data and user preferences become available. Computational experiments have demonstrated that changes in criterion weights lead to transitions between several stable optimal meal structures, reflecting the discrete nature of the considered multicriteria optimization problem.

Keywords: Nutrition planning, diet, dish-level model, decision support system, multicriteria optimization, hybrid AI systems, recommendation systems.

Introduction. Nutrition planning is an important task in the field of dietetics, as dietary intake directly affects human health, disease prevention, and the maintenance of an adequate level of energy and physical activity. Modern approaches to diet formation require consideration of multiple factors, including individual physiological needs, taste preferences, cultural characteristics, food availability, and economic constraints. Due to the need to account for a high degree of personalization, the development of personalized decision support systems based on the use of modeling and optimization methods has become increasingly relevant, enabling the formation of balanced dietary recommendations adapted to individual conditions.

The classical diet problem is one of the first mathematical tools that was applied for rational nutrition planning. It allows one to minimize the total cost of a diet while maintaining nutrient intake standards. Despite its mathematical rigor and widespread application in optimization theory, the classical model has limitations: it

does not account for taste preferences, meal structure, dietary diversity over time, or the dynamics of user needs. These limitations create a gap between the formal solutions of the optimization model and the practical realities of nutrition.

Modern intelligent systems and artificial intelligence methods open up new possibilities for the automation and personalization of meal planning. They enable the integration of expert knowledge, product and recipe data, and the application of machine learning methods to predict nutrient needs and dynamically optimize menus. One promising area is nutrition modeling at the dish level, rather than individual products, ensuring the practical feasibility of recommendations, taking into account taste preferences, and ensuring dietary diversity.

Literature review. The development of automated nutrition planning systems demonstrates a clear evolution from isolated formal models to hybrid intelligent architectures, namely those that are a combination of two metho-

© Chernova N. L., Bezkorovainyi M. R., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



dological approaches: knowledge-driven and data-driven. While early solutions were based primarily on formal optimization models and expert rules, modern systems increasingly integrate decision support methods, machine learning, and generative models [1–9].

The data-driven approach is based on the analysis of large data sets about users, their dietary preferences, health status, weight dynamics, physical activity, and other parameters. Unlike expert systems, decisions are made not based on predefined rules, but on identified statistical relationships. In the context of meal planning, a data-driven approach typically involves the use of machine learning algorithms for classifying users by diet type, regression models for predicting nutrient requirements, clustering methods for segmenting eating habits, gradient boosting and ensemble methods for optimizing calorie intake and balance, neural networks for modeling complex nonlinear relationships, and large language models (LLM) for generating recipes and text recommendations. Among main advantages of the approach are high adaptability to individual data, scalability, ability to account for complex nonlinear relationships, model updates for new data. However, the standalone use of the data-driven approach also has limitations. You may face such problems such the lack of strict constraint guarantees, low explainability of model decisions, dependence on the training sample quality, risk of generating incorrect or unbalanced menus. Thus, the data-driven approach ensures adaptability, but does not always guarantee the formal correctness of the diet.

Knowledge-driven approaches rely on modeling the knowledge of experts, the use of "if-then" rules, product databases, and nutritional guidelines. Classic expert systems can automatically select menus based on the user's parameters [10–13]. Another important tool is constrained optimization methods, which make it possible to construct a diet that simultaneously satisfies several requirements [14–16]. The main advantage of mentioned approach is the transparency of decisions, allowing specialists to trace the rules that led to the formation of a specific menu. However, they have a number of disadvantages, such as: limited adaptability – systems respond poorly to new or non-standard conditions, such as unexpected user dietary preferences; dependence on a knowledge base – outdated or incomplete data can lead to incorrect recommendations; scaling difficulty – maintaining rules and restrictions up-to-date for a large number of users is difficult.

One of the classic problems illustrating the application of this approach is the diet problem, which originally arose as an applied economic model for determining the cheapest diet that satisfies human physiological needs [17]. In such formulation, it is assumed that there is a finite set of foods, each characterized by its cost and nutrient content. The objective of the model is to minimize the total cost of the diet while satisfying the minimum nutritional intake requirements. Even in its basic form, the mentioned model solves a number of practically important problems: rational nutrition planning, economic evaluation of diets, and basic automation of calculations. In this sense, it remains a correct and mathematically rigorous model [18–19]. However, the classical formulation has

several significant limitations when considered from the perspective of real-life tasks: ignoring taste preferences, habits, and cultural characteristics; foods are considered in isolation rather than as dishes consisting of multiple ingredients; the linear model may suggest fractional or excessive quantities of foods; dietary diversity and repetition over time are not taken into account; rigid and deterministic parameters (prices, food composition, consumption norms), which rarely correspond to real-life conditions.

To overcome these limitations, it's necessary to move from individual products to dishes. In everyday practice, people operate with dishes, not individual grams of ingredients: a diet is formed as a sequence of prepared meals with their own structure, taste, and context (breakfast, lunch, dinner). Shifting to dish-level modeling allows for the integration of recipes as fixed or parameterized combinations of products, taking into account technological constraints, repetition frequency, ingredient compatibility, and user preferences. This increases the interpretability of results and improves the practical applicability of models.

Thus, the conducted analysis has shown a number of remaining methodological limitations and underdeveloped aspects. Firstly, integrated dietary optimization models at the dish level are underrepresented, while actual meal planning is typically carried out in terms of ready-made dishes. Secondly, the multi-criteria nature of the problem is often formalized in a simplified manner and does not reflect all real economic, nutritional, behavioral and technological factors. Third, a significant limitation of many solutions is their static nature. The optimization problem is formulated for a fixed time horizon without a mechanism for revising the solution as conditions change. User preferences, changes in health, product seasonality, price fluctuations, and other factors remain outside the dynamic model. Thus, there is no mechanism for a rolling planning horizon, whereby the diet is adjusted as new data becomes available. Fourth, adaptive learning of user preferences is rarely built directly into the optimization problem formulation. Fifth, modern generative models demonstrate high flexibility in menu generation, but their decisions are not backed by strict optimization guarantees. They can generate diverse and personalized recommendations, but they do not guarantee global optimality and do not provide a formal structure for explaining the decision. This leads to a contradiction between adaptability and formal rigor.

Taken together, this means that existing research predominantly either provides formal rigor without sufficient adaptivity or provides adaptivity without strict constraint guarantees. An architecture that integrates these advantages into a single system is lacking.

Given the identified limitations, developing an integrated intelligent meal planning system based on a formalized, dish-level optimization model with a multi-criteria objective function seems a viable option. This model should operate in a dynamic, rolling-horizon mode, provide adaptive learning of user preferences, and maintain the explainability of decisions through a transparent optimization core. This architecture combines the rigor of classical models with the flexibility of modern artificial

intelligence methods, bridging the identified methodological gap and providing a coherent foundation for further research.

The objective of this work is to develop an intelligent meal planning system at the dish level, where the core is a formalized diet optimization model, and the intelligent and user levels provide adaptation, personalization, and explainability of decisions.

The proposed information system is designed to formulate diet plans based on a formalized multi-criteria dynamic diet optimization model, expanded to the dish level. A key feature of the system is that the appropriate mathematical model serves as the computational core, defining the feasible and optimal solution space, while the intelligent and user components operate on top of this core. The design is based on the principle of strict separation of responsibilities between system components, which ensures the correctness of decisions, scalability, and explainability of results. The system is implemented as a multi-level architecture and includes the following logical layers:

- data layer,
- optimization core layer,
- intelligent decision support layer,
- user presentation and interaction layer.

The presence of layers allows us to separate the storage and preparation of data from decision-making, numerical solution of optimization problems, and interpretation of results. Fig. 1 shows a conceptual UML class diagram that clearly demonstrates the key entities of the system, their functions, and their relationships. Let's briefly review the contents of each layer.

The data layer is represented by two classes: *UserProfile* and *Dish*. The *UserProfile* class represents the system's personalization parameters. It contains user goals, individual preferences, constraints (medical, ethical, and taste-related), and a vector of criteria weights for the multi-criteria objective function. This class is associated with *DietModel* and performs the function of parameterizing the model: it is the user profile that determines the structure of the constraints and the relative importance of the criteria. The *Dish* class describes dishes as alternatives in an optimization problem. It includes nutrient profile, cost, and category characteristics.

The optimization core layer consists of three classes: *DietModel*, *Solver*, and *Solution*. *DietModel* is the central entity of the system. It formalizes the mathematical model for multi-criteria dynamic diet optimization. This class aggregates the *Dish* set, obtains parameters from the *UserProfile*, generates a constraint system, and constructs an objective function. Thus, *DietModel* defines a feasible solution space but does not perform a numerical search for the optimum. The *Solver* class implements the computational procedure for solving the optimization problem, producing a *Solution* object as the result. It is important to emphasize that the *Solver* does not interpret the solutions or modify the model structure; it performs strictly a computational function. This ensures the autonomy of the optimization core. The *Solution* class represents the outcome of the optimization problem and contains the selected dishes, aggregated indicators (criterion values),

and the final values of the objective function. This class serves as an intermediate object between the computational core and the intelligent layer.

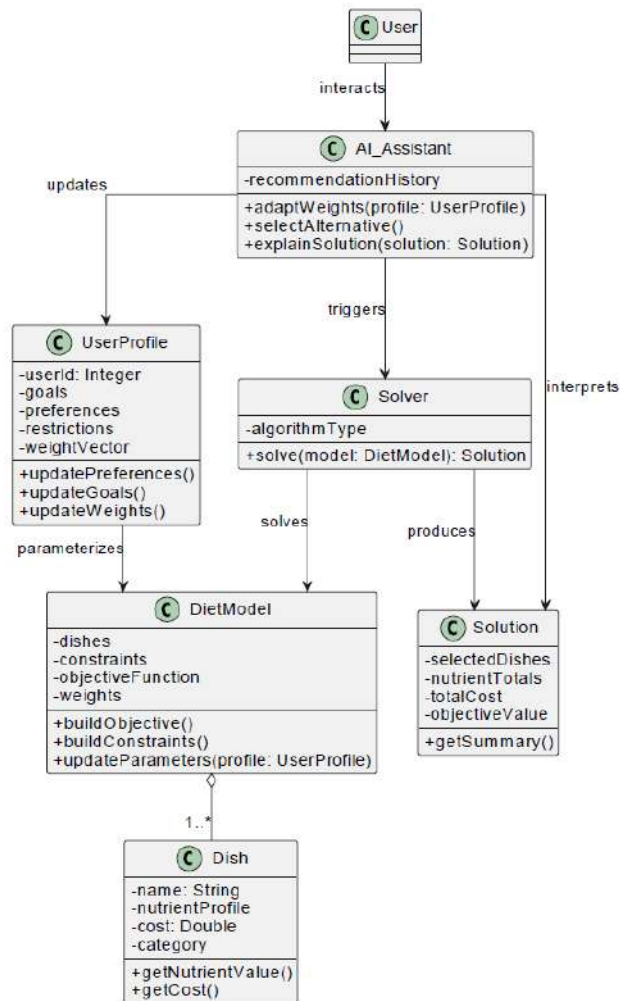


Fig. 1. Intelligent nutrition planning system conceptual UML class diagram

The decision support intelligent layer is represented by the *AI_Assistant* class, which implements the system's intelligent overlay. This class initiates the execution of the *Solver*, analyzes the *Solution* object, adapts criterion weights based on the user profile, interprets the results, and generates explanations. Class relationships: association with *Solver* (managing the solution process), association with *Solution* (interpreting the result), association with *UserProfile* (updating parameters). The intelligent layer does not interfere with the mathematical structure of *DietModel*, but operates within the feasible solution space.

At the presentation and interaction layer, the diagram has a *User* class, which represents the end user of the system and is associated with *AI_Assistant*.

The presented UML class diagram reflects the structural organization of the key entities of the system and the nature of their interactions. At the same time, for a more complete understanding of the logic of the intelligent system's functioning, we should consider its architecture in terms of logical layers.

The data layer serves as the basis for the formation and parameterization of the optimization model. It stores

structured information necessary for creating nutrition plans and personalizing decisions. This layer does not contain decision-making logic: its purpose is to provide reliable and organized data to the upper layers of the system, including the optimization core and the intelligence layer. The layer includes the following databases: a product database, a dish database, a nutrient standards database, and a user profile database.

The product database contains nutritional information for each product, including calories, macronutrients, and micronutrients. It also stores product costs, information on potential allergens, and seasonal availability. This data allows for the appropriate planning of meals, taking into account nutritional value, economic factors, and seasonality.

The dish database includes the ingredients for each dish, creating a "food-dish" matrix. It specifies standard portion sizes, cooking restrictions, and categorization of dishes by mealtimes – breakfast, lunch, dinner, etc. It ensures the correct combination of ingredients in dishes and facilitates meal planning.

The nutrient database contains information on daily and weekly nutrient intake ranges, upper and lower limits for each nutrient, and energy balance targets. It serves as a guide for creating diets to ensure that nutrition meets the user's health standards and energy needs.

The user profile database stores personal data for each user: their goals (weight loss, weight maintenance, weight gain), dietary restrictions, including allergies and individual diets, food preferences, as well as their consumption history and previously created diets. This information allows the system to create personalized recommendations that best suit the user's needs and preferences.

Structured data at this level enables the dynamic generation of optimization models for each user and each scenario. It defines the parameters and constraints for the core of the system—the diet optimization model—forming the basis for accurate, personalized, and explainable decisions.

The central component of the architecture is the optimization core, represented by the diet model. The model formalizes the task of meal planning as an optimization problem, where the variables are the quantities of dish portions, and the constraints reflect nutrient, energy, logical, and time requirements. The optimization core does not contain user logic and does not interpret the results – it is solely responsible for the mathematical correctness of the solutions. The model can be formulated as a mixed-integer linear programming problem or its extension, depending on the complexity of the factors considered. The basic version of the model is described below.

Let's introduce the following notations:

$y_k \in Z, y_k \geq 0$ – number of portions of the k -th dish included in the diet, $k = 1, \dots, K$;

K – total number of dishes;

r_{jk} – the amount of product j included in one portion of dish k , $j = 1, \dots, n$;

n – total amount of food products;

c_j – unit cost of the j -th product;

a_{ij} – the content of nutrient i in one unit of product j , $i = 1, \dots, m$;

m – total number of nutrients;

b_i^{\min}, b_i^{\max} – minimum and maximum acceptable intake of the i -th nutrient.

It is suggested to apply the following aggregated parameters of dishes: amount of the i -th nutrient in the k -th dish: $A_{ik} = \sum_{j=1}^n a_{ij} r_{jk}$; total cost of the k -th dish:

$$C_k = \sum_{j=1}^n c_j r_{jk}.$$

The basic single-criteria version of the model is the following.

Objective function: $\min \sum_{k=1}^K C_k y_k$; nutrient

restrictions: $b_i^{\min} \leq \sum_{k=1}^K A_{ik} y_k \leq b_i^{\max}$; restrictions on the

number of dishes: $0 \leq y_k \leq \bar{y}_k$; structural restrictions:

$$\sum_{k=1}^K y_k = M, \sum_{k \in G} y_k \leq 1.$$

Let's consider possible extensions of the basic version of the model.

Below, we propose a multi-criteria model that simultaneously considers several, potentially conflicting, nutritional planning objectives. Unlike single-criteria models, this formulation allows us to formalize real trade-offs between economic, nutritional, behavioral, and consumer diet aspects.

Generally, the model can be presented as follows: $\min f(y) = (f_1(y), \dots, f_G(y))$, where $f_g(y)$ – g -th optimality criterion, $g = 1, \dots, G$.

Due to the inconsistency of the criteria, such a problem typically does not have a single optimal solution in the classical sense. Instead, a multitude of compromise alternatives is generated, between which a choice is made using specialized multi-criteria optimization methods (scalarization, ε -constraints, Pareto frontier) [20–23].

In the developed system we propose using a scalarization method to solve a multi-criteria dietary problem. This reduces the vector objective function to a single aggregated function of the form:

$$\min \sum_{g=1}^G w_g f_g(y), w_g \geq 0, \sum_{g=1}^G w_g = 1,$$

where w_g – weight of the g -th optimality criterion.

This approach significantly simplifies the computational implementation of the model and ensures its compatibility with MILP solvers. However, the key methodological challenge of scalarization is determining the weighting coefficients reflecting the relative importance of individual optimality criteria.

To solve this problem, we propose using expert methods of multicriteria analysis, particularly pairwise comparison methods. These methods allow us to formalize the subjective preferences of an expert or user and transform them into quantitative weights used in the model. It is assumed that the decision maker is able to express

preferences between each pair of criteria in terms of relative importance. The pairwise comparison model is then defined by so cold square preference matrix:

$$H = (h_{ij}), \quad i, j = 1, \dots, G, \quad h_{ij} \geq 0, \quad h_{ii} = 1, \quad h_{ij} = \frac{1}{h_{ji}}.$$

Matrix H is interpreted as a formalized representation of expert judgments regarding the importance of criteria. Based on this matrix, a weight vector is determined that reflects the aggregated relative importance of the criteria. Additionally, a measure of the preference matrix consistency can be considered, allowing one to assess the internal consistency of expert judgments and, if necessary, adjust the initial estimates. This ensures the stability and reliability of the resulting weighting coefficients. Thus, the pairwise comparison model serves as a link between the subjective preferences of the user or expert and the formalized optimization model, ensuring a correct and interpretable assignment of the parameters of the multi-criteria objective function [24–26].

The multi-criteria diet model discussed above describes the meal planning process in a static mode, where the diet is formed without explicitly considering the temporal structure of consumption. However, in practice, nutrition is distinctly dynamic: meals are distributed over time, nutrient and energy restrictions apply on both a daily and weekly basis, and the user's preferences and goals may change.

In the dynamic model, a diet is considered as a sequence of decisions $y = \{y_t\}_{t \in T}$, where y_t describes the set of dishes consumed at time t . The set of feasible decisions is formed taking into account time constraints, such as: daily and weekly nutrient intake standards, restrictions on the frequency of meal repetitions, requirements for menu variety over time, cumulative effects (nutrient deficiencies or excesses).

Accordingly, the vector of objective functions also acquires a temporal structure and can be written in the following aggregated form:

$$\min F(y) = (\sum_{t \in T} f_{1t}(y_t), \dots, \sum_{t \in T} f_{Gt}(y_t)).$$

Further, the problem can be represented as a problem of minimizing the weighted sum of aggregated criteria:

$$\min_{y \in Y} \sum_{g=1}^G \sum_{t \in T} w_g f_{gt}(y_t),$$

where $f_{gt}(y_t)$ – local indicator of diet quality at time t according to criterion g .

The dynamic multi-criteria model allows for consideration of trade-offs not only between various criteria but also between the user's short-term and long-term goals. For example, a temporary deviation from energy balance on a particular day can be compensated for within the weekly plan without compromising overall nutrient standards. The result is an adaptive nutrition plan that simultaneously considers the user's short-term needs and long-term goals.

From the perspective of the architecture of an

intelligent meal planning system, dynamic formulation creates an expanded solution space within which the intelligent assistant performs:

- consistent adaptation of diets over time;
- recalculation of solutions when user data or external conditions change;
- support for "what if" scenarios and planning on a rolling horizon.

Using a sliding horizon mechanism means that optimization is performed over a limited time interval, after which the horizon is shifted forward, taking into account decisions already made and updated information.

Let the planning horizon be P days. At time t , the system solves a dynamic multicriteria problem over the interval $[t, t + P]$, generating a supply plan for several days in advance. After the solution for the first period is implemented, the horizon shifts, and the problem is solved again for the interval $[t + 1, t + 1 + P]$.

This mechanism allows:

- to account for actual dishes consumed;
- to correct accumulated nutrient deviations;
- to adapt to changes in preferences or external conditions;
- to maintain flexibility without having to recalculate the entire long-term plan.

Additionally, a user preference learning mechanism can be integrated into the dynamic setup. User preferences are rarely explicitly and statically defined. In a real system, they are refined as the user interacts with the assistant. This requires the inclusion of an appropriate learning mechanism.

Let's say one of the model's criteria describes the discrepancy between the diet and individual preferences: $f_{\text{pref}}(y, \theta)$, where θ – user preference parameters. During system operation, these parameters are updated based on actual dish selections, rejections of proposed alternatives, satisfaction ratings, and the frequency of repeat selections for certain categories. Based on the history of accepted and rejected meal plans, the system adjusts the weighting coefficients of the multi-criteria objective function and the penalty parameters for deviations from preferences, ensuring gradual personalization of the model without changing its basic structure.

The described mechanisms of dynamic optimization, rolling horizon, and user preference learning are not implemented directly at the optimization core layer. Their use requires a separate control layer responsible for adapting model parameters, reinitializing optimization problems, and interpreting the resulting solutions in the context of user goals and behavior. In the architecture of an intelligent meal planning system, this function is performed by an intelligent decision support layer, described below.

The intelligent decision support layer adapts, personalizes, and explains the optimization model's results. It operates on top of the optimization core and uses the solutions provided by the solver to generate recommendations that can be directly understood and used by the user. Unlike the optimization layer, which is solely responsible for the formal correctness of solutions and the numerical

solution of the optimization problem, this layer ensures interpretation, parameter management, and adaptation of solutions to the user's individual needs. The layer follows a hybrid approach that combines rule-based reasoning with lightweight data-driven adaptation mechanisms. Rule-based components ensure consistency with nutritional logic and model constraints, while data-driven elements enable personalization based on user preferences, feedback, and behavioral patterns. Let's consider the tasks at this layer.

Model parameter adaptation. The layer enables dynamic adjustment of multi-criteria model parameters, including weight adjustments in the multi-criteria objective function based on user preferences, activation or deactivation of constraints based on individual dietary requirements, consideration of the user's personal goals, such as weight loss, weight maintenance, or muscle gain. The update rule can be defined as:

$$w_g^{t+1} = w_g^t + \alpha u_g^t,$$

where u_g^t – user feedback signal;

α – learning rate parameter.

In a rolling horizon context, adaptation is iterative: model parameters are adjusted as information about the user's behavior and preferences accumulates.

Solution space navigation. The dynamic model generates a set of feasible diets, including the Pareto frontier in multi-criteria settings. The intelligent layer evaluates and ranks these alternatives using a user-specific utility function constructed from the adapted weights:

$U(y) = \sum_{g=1}^G w_g^t f_g(y)$. The preferred solution is selected from the Pareto set $P \subseteq Y$ as $y^* = \arg \min_{y \in P} U(y)$.

The layer constructs a ranked subset of alternatives to support comparison, trade-off analysis, and “what-if” exploration. This enables informed decision-making in an expanded solution space that reflects both short-term preferences and long-term user goals.

The task of interpreting and explaining decisions. The explanation process consists of three sequential stages: feature extraction from the optimization solution, transformation into semantically meaningful indicators, and generation of user-oriented textual explanations. For each feasible diet plan, the system evaluates the contribution of individual dishes to objective criteria and constraint satisfaction. These contributions are directly derived from the parameters and structure of the optimization model and therefore remain fully consistent with the underlying mathematical formulation. Based on these evaluations, the relative importance of each dish within the solution is determined, allowing the identification of key elements responsible for achieving nutritional balance and satisfying user-defined goals. The interpretation mechanism is implemented using a set of deterministic rules that map quantitative indicators to predefined explanation templates. This enables the system to generate consistent justifications for dish selection, as well as to identify feasible substitutions that preserve nutritional and energetic properties of the diet.

Thus, the intelligent layer serves as a link between numerically determined optimal solutions and the end user,

transforming the model's formal results into practical recommendations that are understandable and convenient for decision-making. This layer enables dynamic adaptation, supports “what-if” scenarios, and allows for real-time consideration of changing user preferences and conditions.

Let's consider the presentation and user interaction layer. It facilitates communication between the user and the intelligent meal planning system and serves as an interface layer over the system's analytical components. The layer does not contain its own data storage mechanisms or implement computational optimization logic, but rather handles query generation, result visualization, and interpretation of decisions received from the underlying architecture layers. Architecturally, this layer serves as an intermediary between the user, the intelligent decision support layer, and the centralized data layer. All access to recipe databases, nutrient tables, and user profiles is handled through the data layer's service interfaces, eliminating information duplication and ensuring system integrity. Let's consider its main functions.

The user query generation and structuring function collects input parameters for the nutrition planning task. The user can specify target indicators (weight loss, fitness maintenance, weight gain), restrictions (allergies, medical contraindications, excluded foods), preferences (flavor categories, frequency of meal repetitions), planning time horizon, and acceptable deviations from target values. Input can be performed both in structured form (via parameters and filters) and in dialog mode. When using text input, the interpretation module transforms the natural language query into a formalized set of parameters passed to the intelligent layer. Thus, the presentation layer performs the function of parameterizing the multi-criteria optimization model without changing its mathematical structure.

Interaction with the intelligent layer. After the query is structured, the parameters are passed to the intelligent decision support layer, which refines criteria priorities, adjusts weighting factors, takes into account interaction history, and generates a problem statement for the optimization core.

The presentation layer does not make dietary decisions independently. It initiates the computational process and receives from the intelligent layer a pre-processed result corresponding to the feasible solution space generated by the optimization core.

Data layer access function. All operations related to obtaining information about dishes, recipes, nutritional composition, and user profiles are performed through a centralized data layer. The presentation layer requests the necessary data through service interfaces, displays the received information in a user-friendly format, and transmits updated parameters back to the system. Data storage, updating, and consistency are fully supported by the data layer and are not duplicated in the interface.

Decision visualization and explanation function. After receiving a decision from the intelligent layer, the user interface displays the diet plan by day and meal, displays the nutrient balance, visualizes deviations from target values, compares alternative options, and explains the reasons for choosing specific dishes. The explanation

mechanism is based on the decomposition of the objective function and model constraints. The user can obtain information about the criteria and constraints that influenced the proposed diet. This ensures the transparency and explainability of decisions characteristic of intelligent decision support systems.

Feedback function. The presentation layer also collects feedback, including: acceptance or rejection of a proposed dish, request for alternatives, preference adjustments, and satisfaction ratings. The received information is passed to the intelligence layer, where it is used to adaptively adjust the model parameters (specifically, the criterion weights and preference function parameters).

Thus, the presentation layer closes the interaction loop: user data is fed to the intelligence layer, which manages the optimization model, and the decision results are returned to the interface for analysis and selection. This approach ensures the system's dynamic and personalization.

To illustrate the performance of the proposed multicriteria model, we consider the problem of creating a daily diet from a finite set of ten alternative dishes. Each dish is characterized by the following parameters: energy value, protein, fat, and carbohydrate content, cost per portion, and its functional group (breakfast, main meal, light meal). The goal is to create a daily diet from three dishes that satisfies established nutrient restrictions. The diet is created taking into account three optimality criteria: minimizing the total cost of the selected dishes, minimizing the deviation of the actual caloric content of the diet from the target value, and minimizing the penalty for not including representatives of functional groups in the diet. The numerical parameters of the problem are formed on the basis of generalized data contained in open tables of the chemical composition of food products.

The mathematical formulation of the problem is presented below:

$$\min_{y,d,z} (w_1 \sum_{k=1}^K s_k y_k + w_2 d + w_3 \sum_{g \in G} Z_g),$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1, \quad w_1, w_2, w_3 \geq 0,$$

$$d = \left| \sum_{k=1}^K e_k y_k - e^* \right|,$$

$$z_g \geq 1 - \sum_{k:g_k=g} y_k, \quad z_g \geq 0,$$

where $y_k \in \{0,1\}$ – the number of portions of the k -th dish included in the diet, $k = 1, \dots, K$;

d – deviation of the caloric content of the diet from the standard value;

z_g – penalty for absence of functional groups of dishes;

K – total number of dishes;

s_k – unit cost of the k -th dish;

e_k – unit calorific value of the k -th dish;

e^* – standard caloric value.

In this case, the following restrictions must be met.

Structural restrictions:

$$\sum_{k=1}^K y_k = 3.$$

Nutrient restrictions:

$$b_i^{\min} \leq \sum_{k=1}^K A_{ik} y_k \leq b_i^{\max},$$

where A_{ik} – the amount of nutrient i in dish k ;

$i = 1, \dots, m$, $m = 3$ – total number of nutrients;

b_i^{\min} , b_i^{\max} – minimum and maximum acceptable intake of nutrient i .

Calorie restrictions:

$$e^{\min} \leq \sum_{k=1}^K e_k y_k \leq e^{\max}.$$

To study the influence of the decision maker's preferences on the structure of the optimal diet, a computational experiment was conducted in the Python environment using the PuLP library.

During the experiment, the weight coefficient w_1 was sequentially varied within the range $[0;1]$. The remaining weight was distributed equally between w_2 and w_3 . For each value of w_1 an optimization problem was solved, and the values of the key indicators were recorded: the total cost of the diet, the deviation from the target caloric level, and the diversity indicator. Based on the obtained results, graphs were constructed showing the dependence of these characteristics on the weight w_1 (see Fig. 2 – Fig. 3).

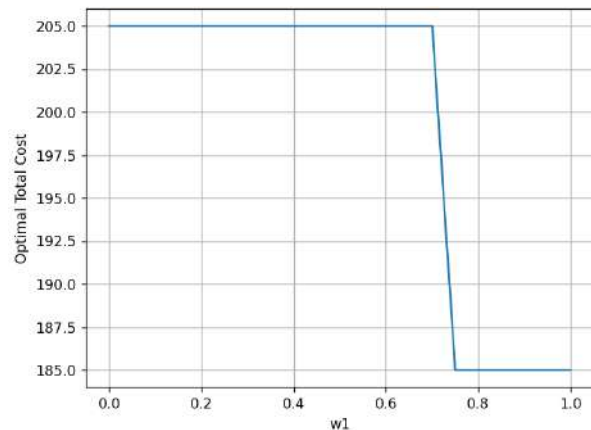


Fig. 2. Optimal total cost vs w_1

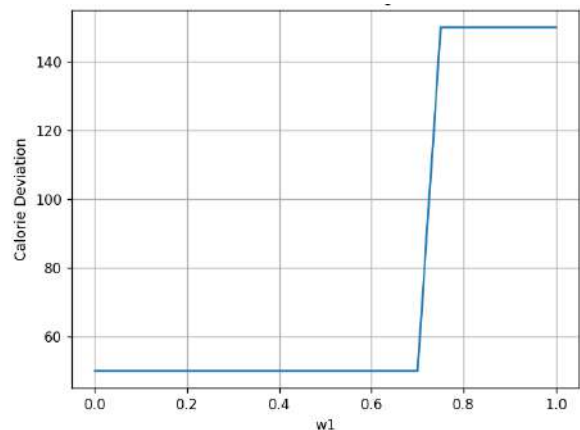


Fig. 3. Calorie deviation vs w_1

The cost graph demonstrates two stable solution regimes. For relatively small values of w_1 , the optimal diet is the one that more closely matches the target caloric intake, but has a higher total cost. As w_1 increases, a transition to an alternative diet with a lower cost occurs. This transition occurs abruptly upon reaching a certain threshold.

The graph of deviation from the target calorie value shows the opposite trend. A decrease in the cost is accompanied by an increase in deviation from the target calorie value. This indicates a conflict between the criteria and confirms the need for a multi-criteria approach.

We do not present here the dependence of diet diversity on w_1 , as in the current experiment, this diversity indicator remains constant. This means that both found optimal diets have the same structure across meal groups. Consequently, the diversity criterion in this set of alternatives does not significantly influence the choice of the optimal solution, although its inclusion in the model allows for control over the structural characteristics of the diet and may play a more significant role when expanding the set of feasible alternatives. Overall, the analysis shows that changing preferences between criteria leads to a transition between several stable structures of the optimal diet, reflecting the discrete nature of the current multi-criteria optimization problem.

Conclusions and future research directions. This paper develops the concept of an integrated intelligent meal planning system at the dish level, based on a formalized multi-criteria dynamic optimization model. Unlike the classic diet problem, where individual products are the object of optimization, the proposed approach implements modeling at the level of finished dishes, improving the practical feasibility, interpretability, and applicability of the resulting diets.

An analysis of existing research revealed a methodological gap between knowledge-driven and data-driven approaches to personalized nutrition. The former provide mathematical rigor and constraint guarantees, but have limited adaptability. The latter are characterized by high flexibility and the ability to incorporate behavioral data, but do not provide formal guarantees of decision correctness. The proposed architecture bridges this gap by integrating a formal optimization core and an intelligent adaptation layer.

A multi-criteria diet model was developed using a scalarization method and an expert-based weighting mechanism based on pairwise comparisons of criteria. This ensures the formalization of user subjective preferences and their integration into a rigorous optimization formulation. Additionally, the model was expanded to a dynamic form, taking into account the time structure of nutrition, intertemporal constraints, and a sliding planning horizon mechanism.

A multi-layered system architecture is proposed, including a data layer, an optimization core, an intelligent decision support layer, and a user interaction layer. A clear division of responsibilities between the components ensures scalability, modifiability, and explainability of the system. The intelligent layer implements adaptation of

model parameters, navigation in the solution space, and a preference learning mechanism without disrupting the mathematical structure of the problem.

Thus, the developed approach forms a holistic theoretical and methodological basis for the construction of intelligent personalized nutrition planning systems that combine the rigor of optimization methods with the adaptability of modern artificial intelligence technologies.

Promising areas for further research include experimental validation of the model on real user data; integration of stochastic factors; and the use of robust and stochastic optimization methods. In addition, the preference learning mechanism can be extended using data-driven approaches to improve the adaptation of criterion weights over time. Further development of the intelligent decision-support layer, particularly the explanation module, is also of interest, including the use of advanced natural language generation techniques to enhance the quality and interpretability of recommendations. Finally, future work may focus on the development of a prototype software implementation of the system and its comparative evaluation with existing solutions.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT and Grammarly for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text. After using these tools, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

1. Papastratis, I., Konstantinidis, D., Daras, P. et al. AI nutrition recommendation using a deep generative model and ChatGPT. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 14620. DOI: 10.1038/s41598-024-65438-x.
2. Zhang J., Wang Z., Liu W. et al. A unified approach to designing sequence-based personalized food recommendation systems: tackling dynamic user behaviors. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2023, vol. 14, pp. 2903–2912. DOI: 10.1007/s13042-023-01808-7.
3. Kalpakoglou K., Calderón-Pérez L., Boqué N., Guldás M., Erdoğan Demir Ç., Gymnopoulos L. P., Dimitropoulos K. An AI-based nutrition recommendation system: technical validation with insights from Mediterranean cuisine. *Frontiers in Nutrition*. 2025, vol. 12, article 1546107. DOI: 10.3389/fnut.2025.1546107.
4. Wang X., Sun Z., Xue H., An R. Artificial intelligence applications to personalized dietary recommendations: a systematic review. *Healthcare*. 2025, vol. 13, no. 12, article 1417. DOI: 10.3390/healthcare13121417.
5. Sharma S. K., Gaur S. Optimizing nutritional outcomes: the role of AI in personalized diet planning. *International Journal for Research Publication and Seminar*. 2024, vol. 15, no. 2, pp. 107–116. DOI: 10.36676/jrps.v15.i2.15.
6. Hussain S., Khan N., Ali Shah S. A., Bano S. AI driven personalized meal planning: a web based platform for tailored nutrition and health management. *International Journal of Computer Applications*. 2025, vol. 187, no. 57, pp. 17–29. DOI: 10.5120/ijca2025925913.
7. Agrawal K., Goktas P., Kumar N., Leung M.-F. Artificial intelligence in personalized nutrition and food manufacturing: a comprehensive review of methods, applications, and future directions. *Frontiers in Nutrition*. 2025, vol. 12, article 1636980. DOI: 10.3389/fnut.2025.1636980.
8. Pinto J., Silva M., Santos P. An AI based nutrition recommendation system: technical validation and personalized dietary planning. *Frontiers in Nutrition*. 2025, article 1546107. DOI: 10.3389/fnut.2025.1546107.
9. Marashi-Hosseini, L., Jafairad, S. & Hadianfard, A.M. A fuzzy based dietary clinical decision support system for patients with multiple

- chronic conditions (MCCs). *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, article 12166. DOI: 10.1038/s41598-023-39371-4
10. Petot G. J., Marling C., Sterling L. An artificial intelligence system for computer-assisted menu planning. *Journal of the American Dietetic Association*. 1998, vol. 98, no. 9, pp. 1009–1014. DOI: 10.1016/S0002-8223(98)00231-4.
 11. Unal C., Çilgin C. Web based expert system design and implementation for personal nutrition planning. *International Journal of Management Information Systems and Computer Science*. 2022, vol. 6, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.33461/uybisbbd.1013012.
 12. Tabassum N., Rehman A., Hamid M., Saleem M., Malik S. et al. Intelligent nutrition diet recommender system for diabetic patients. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2021, vol. 30, no. 1, pp. 319–335. DOI: 10.32604/iasc.2021.018870.
 13. Fraser R. B., Turney S. Z. An expert system for the nutritional management of the critically ill. *Computers in Methods and Programs in Biomedicine*. 1990, vol. 33, no. 3, pp. 175–180. DOI: 10.1016/0169-2607(90)90040-G.
 14. Fortune A. C., Garba E. J., Teman M. E., Uchenna O. J. Expert system software framework for nutritional analysis and diet-related disease. *International Journal of Development Mathematics*. 2024, vol. 1, no. 3, pp. 218–227. DOI: 10.62054/ijdm/0103.17.
 15. van Dooren C. A review of the use of linear programming to optimize diets, nutritiously, economically and environmentally. *Frontiers in Nutrition*. 2018, vol. 5, article 48. DOI: 10.3389/fnut.2018.00048.
 16. Soares T. F., Escarpinati M. C., Gabriel P. H. R. Multi-objective optimization applied to diet planning for people with diabetes. *Pesquisa Operacional*. 2024, vol. 44, article 285156. DOI: 10.1590/0101-7438.2023.043.00285156.
 17. Stigler G. The cost of subsistence. *Journal of Farm Economics*. 1945, vol. 27, no. 1, pp. 303–314
 18. Alaini R., Rajikan R., Elias S. M. Diet optimization using linear programming to develop low cost cancer prevention food plan for selected adults in Kuala Lumpur, Malaysia. *BMC Public Health*. 2019, vol. 19, article 546. DOI: 10.1186/s12889-019-6872-4.
 19. Prajapati U., Jain T., Machiraju A., Kaushik D. Linear optimization for the perfect meal: a data driven approach to optimising the perfect meal. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2501.04143.
 20. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester, John Wiley & Sons, 2001. ISBN 978-0-471-87339-6
 21. Miettinen K. Nonlinear multiobjective optimization: a tutorial. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2012, vol. 11, no. 2, pp. 297–325. DOI: 10.1142/S0219622012400039.
 22. Blank J., Deb K. Pymoo: multi-objective optimization in Python. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 89497–89509. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2990567
 23. Ehrgott M. *Multicriteria optimization*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005. DOI: 10.1007/3-540-27659-9
 24. Ramík J. *Pairwise comparisons method: theory and applications in decision making*. Cham, Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-39891-0
 25. Mazurek J. *Advances in pairwise comparisons: detection, evaluation and reduction of inconsistency*. Cham, Springer, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-23884-0
 26. Lahdelma R., Salminen P., Kuula M. Testing the efficiency of two pairwise comparison methods in discrete multiple criteria problems. *European Journal of Operational Research*. 2003, vol. 145, no. 3, pp. 496–508. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00214-X

Received 01.03.2026

Accepted 20.03.2026

Published 20.05.2026

УДК 004.8, 519.85, 613.2

Н. Л. ЧЕРНОВА, кандидат економічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; e-mail: natalia.chernova@kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0073-8457>

М. Р. БЕЗКОРОВАЙНИЙ, аспірант кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; e-mail: mykyta.bezkorovainyi@cs.kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8137-2760>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПЛАНУВАННЯ ДІЄТИ НА РІВНІ СТРАВ НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

У статті розглянуто проблеми створення та впровадження інтелектуальних систем персоналізованого планування харчування. Сучасні дослідження у цій галузі демонструють перехід від класичних формалізованих моделей дієти до гібридних архітектур, що поєднують дві методологічні парадигми: knowledge-driven та data-driven підходи. Проте між ними існує певний методологічний розрив. Моделі, орієнтовані на знання (knowledge-driven), забезпечують математичну строгість і гарантують дотримання нутріційних та ресурсних обмежень, однак зазвичай мають обмежену адаптивність і персоналізацію. Натомість підходи, орієнтовані на дані (data-driven), зокрема сучасні генеративні моделі, демонструють високу гнучкість і здатність враховувати поведінкові дані, але не забезпечують формальних гарантій оптимальності та виконання обмежень. Це протиріччя зумовлює необхідність розроблення інтегрованої інтелектуальної системи планування харчування, яка поєднає переваги обох підходів. Метою дослідження є створення інтелектуальної системи планування харчування на рівні страв, ядром якої є формалізована багатокритеріальна оптимізаційна модель дієти. На відміну від класичної задачі дієти, де оптимізація виконується щодо окремих харчових продуктів, запропонований підхід моделює харчування на рівні готових страв, що підвищує практичну реалізованість, інтерпретованість та зручність використання отриманих дієтичних планів. Математична модель формулюється як задача багатокритеріальної оптимізації, у якій змінні рішення представляють кількість порцій страв, тоді як обмеження відображають нутріційні, енергетичні, логічні та часові вимоги. Запропонована модель реалізована в межах багаторівневої архітектури системи, що складається з рівня даних, оптимізаційного ядра, інтелектуального рівня підтримки прийняття рішень та рівня взаємодії з користувачем. Оптимізаційне ядро забезпечує математичну коректність і обчислення оптимальних рішень, тоді як інтелектуальний рівень забезпечує адаптацію, персоналізацію та інтерпретацію результатів. Модель також розширено до динамічної форми із використанням ковзного горизонту планування, що дозволяє оновлювати план харчування у міру надходження нових даних та змін користувацьких уподобань. Обчислювальні експерименти продемонстрували, що зміна ваг критеріїв призводить до переходів між кількома стабільними оптимальними структурами раціону, що відображає дискретну природу розглянутої задачі багатокритеріальної оптимізації.

Ключові слова: планування харчування, дієта, модель на рівні страв, система підтримки прийняття рішень, багатокритеріальна оптимізація, гібридні системи штучного інтелекту, рекомендаційні системи.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чернова Наталя Леонідівна / Chernova Natalia Leonidivna

Автор 2 / Author 2: Безкоровайний Микита Романович / Bezkorovainyi Mykyta Romanovych

A. A. PAVLOV, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Professor of Computer Science and Software Engineering Department; e-mail: alexanderpavlov1944@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

M. Ye. KYSELOV, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Bachelor of Informatics and Software Engineering Department, Kyiv, Ukraine, e-mail: zeusmobilenick@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3686-3419>

VERIFICATION OF EMPIRICAL MODELS OF SIMPLEX METHOD COMPLEXITY USING THE MODIFIED GMDH

This paper presents the results of constructing an empirical dependence of the number of arithmetic operations of the standard simplex method as a function of the problem dimensionality defined in canonical form. To address this problem, the principle of model self-organization based on a modified combinatorial algorithm of the Group Method of Data Handling is applied. The modification of Group Method of Data Handling consists in forming a residual representation that is assumed to contain the sought empirical complexity function, as well as in applying a preliminary partitioning algorithm for the basis functions, which are additively included in the residual representation, into two non-overlapping classes: the class of main dominant components and the class of refining residual components. This approach significantly reduces the combinatorial search procedure. Based on theoretical complexity estimates available in the literature, a redundant set of basis functions was constructed. Five fundamental models were considered: Borgwardt's polynomial estimate, the Adler – Megiddo quadratic bound, a basic polynomial form, the smoothed analysis model of Spielman – Teng, and a general mixed model previously proposed by the authors. To expand the search space, a logarithmic component was added to the basis functions. Thus, the residual representation includes six basis components, along with all their squares and pairwise products. The optimal structure was selected using a symmetric regularity criterion by evaluating more than 134 million alternative models, the number of which is uniquely determined by the cardinality of the set of refining residual components. To ensure the correct application of the least squares method for strongly nonlinear regressors of different scales (whose absolute values differ by several orders of magnitude), the necessity of scaling input data by their standard deviation, with optional centering, was experimentally justified. The efficiency of this approach was confirmed through a specially designed experiment with a known ideal solution, including a constant term (bias) at the order of 100000 and normally distributed noise with an amplitude of 1 % of the mean value of the ideal regression on the values of the input variables of the experiment. The results of simulation modeling on a dataset of 13690 randomly generated linear programming problems demonstrate the clear superiority of the mixed polynomial-logarithmic structure within the extended class of candidate functions.

Keywords: simplex method, model self-organization, modified Group Method of Data Handling, least squares method, redundant representation, regularity criterion, data standardization.

1. Introduction. Publications [1, 2] consider applied problems, the solution of which requires the solution of on average hundreds of linear programming (LP) problems with thousands of variables. The efficient implementation of such algorithms is based on parallelization of calculations, which requires knowledge of efficient estimates of the number of simplex method's arithmetic operations as a function of the dimensionality of the LP problem given in canonical form [3].

With the aim to verify the objectivity of the empirical complexity formula previously proposed by the authors ($0.63m^{2.96}n^{0.02}\log^{1.62}n + 4.04m^{-4.11}n^{2.92}$, where m is the number of equations, n is the number of non-negative variables), which was found using the four common basis functions presented in the abstract, and seven in total, using the modified Group Method of Data Handling (MGMDH) [4]. For this, in this work, the MGMDH is used for the case when the residual representation, according to which the search for the empirical formula of complexity is implemented, is extended to the basis functions, their squares and all pairwise products.

The use of the MGMDH allows us to move away from the a priori defining the model structure and find the optimal dependence by a reduced search of subsets of basis functions, their squares and all pairwise products using the regularity criterion first proposed by Ivakhnenko O. A., as a part of the classical Group Method of Data Handling

(GMDH). Finding the coefficients for partial representations (partial models) is done using the least squares method (LSM). The selection of the optimal structure is carried out using the symmetric regularity criterion, which is the sum of two components, each of which is the value of the residual sum of squares on the test sequence for the case when the data from which the partial representations of the sought model are built and the data from which the value of the regularity criterion is found are interchanged. Since the redundant representation contains significantly nonlinear basis functions, the values of which can differ by orders of magnitude, the classical implementation of the residual representation of the MGMDH for linear models requires an appropriate correction.

2. Basic theoretical provisions and data generation. To objectively investigate the computational complexity of the standard simplex method, it is necessary to generate a representative sample of random LP problems in canonical form. To ensure the admissibility of the constraint system, the generation is carried out by the inverse construction method.

That is, the components of the non-negative solution of the vector \mathbf{x} and the parameters of the LP problem are generated as realizations of random variables that have a uniform distribution on the intervals $(0.1, f + 0.1)$ for the components of the vector \mathbf{x} , on the interval $(0, f)$ for the



parameters of the constraint matrix A . The vector of the right-hand side b is generated by the formula $b = Ax + \delta$, where x is the solution of the LP problem, δ is a vector whose components are realizations of random variables that have a uniform distribution on the interval $(0, 2f)$. The components of the vector c (the optimality criterion of the LP problem) were also generated from a uniform distribution on the interval $(0, f)$. The quantity f acts as a hyperparameter (scaling factor), which allows you to flexibly control the order of quantities in the generated data. This allows you to more correctly find the empirical complexity function of the simplex method.

As mentioned in the introduction, to build an empirical model of complexity on the obtained data, the MGMDH is used [4]. Unlike the classical combinatorial GMDH, which involves a complete enumeration of all possible combinations of basis functions (which is computationally impossible for large bases) and does not specify a residual representation containing the sought solution structure, the modification of the GMDH also consists in a preliminary partitioning of the space of the set of components of the residual representation, linear with respect to unknown coefficients, into two classes. Based on the initial LSM estimate, the algorithm identifies a cluster of main dominant components (set M_1) and assigns the remaining basis functions to a cluster of clarifying residual components (set M_2). The structure of each partial representation contains a mandatory component from the set M_1 and an arbitrary subset of components from the set M_2 . It is postulated that the sought empirical formula for the complexity of the simplex method belongs to the set of partial representations formulated above.

3. Data standardization issues. To ensure the correct operation of the LSM within the framework of structural identification, the stage of preliminary data preparation is critically important. In computational complexity estimation problems, the redundant representation contains significantly nonlinear basis functions (see Section 5), for example, such as $\ln m + \ln n$ or $m^3 n^2$. Since their absolute values differ by many orders of magnitude, direct application of the LSM to raw data leads to serious distortions: functions with significant absolute values receive coefficients that are insignificant in absolute value, which makes it impossible to correctly algorithmically select significant basis functions by absolute values of their coefficients. According to the classical theory of regression analysis [5], an efficient solution to this problem is the standardization of predictors that includes centering (subtraction of the mean) and scaling (division by the standard deviation σ of the generated values of the input variables from their mean value) [6]. However, in our case, the input parameters (dimensions of matrices) and the output objective function (the number of operations) have strictly non-negative values. The use of the centering operation inevitably leads to the appearance of artificial negative values, which destroys the physical logic of the problem and complicates the interpretation.

In view of this, this work justifies the use of only the scaling operation without centering. In general, the scaling procedure is as follows.

Let the regression model be of the form:

$$y(x_1, \dots, x_m) = \omega_0 + \sum_{j=1}^r \omega_j f_j(x_1, \dots, x_m) + \varepsilon, \quad (1)$$

where ε is a random variable, the coefficients ω_j , $j = \overline{0, r}$, are unknown. The test results:

$$\left((x_{1i}, \dots, x_{mi}) \rightarrow y_i, i = \overline{1, n} \right), \quad (2)$$

we replace model (1) with the following:

$$\hat{y}(x_{1i}, \dots, x_{mi}) = \omega_0 + \sum_{j=1}^r \omega_j \frac{f_j(x_{1i}, \dots, x_{mi})}{\sigma_j}, i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

where

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(f_j(x_{1i}, \dots, x_{mi}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_j(x_{1i}, \dots, x_{mi}) \right)^2}.$$

According to model (3), based on the results of statistical tests (2), using the LSM we find estimates of unknown coefficients. The final constructed regression has the form:

$$\hat{y}(x_1, \dots, x_m) = \hat{\omega}_0 + \sum_{j=1}^r \frac{\hat{\omega}_j}{\sigma_j} f_j(x_1, \dots, x_m). \quad (4)$$

Remark. The MGMDH uses the presented scaling procedure for finding estimates of the unknown coefficients for all partial representations.

Such preprocessing is a necessary condition for the LSM to be able to adequately estimate the parameters, and for the clustering algorithm of the GMDH to correctly separate the main representation from the noise one without losing the physical sense.

It is important to note that such an exact algebraic equivalence is a specific property of models that are linear in parameters. In most other machine learning algorithms (e.g., decision trees or multilayer neural networks), such an analytical denormalization of weights is not possible because the scale of arguments is nonlinearly woven into the internal structure of decision making [7].

4. Synthetic test proving the importance of scaling.

To experimentally prove the hypothesis of the critical need for data scaling, a verification simulation test was conducted on synthetic data with a known reference structure.

A sample of 500 points was generated, where the independent arguments varied in the range $m, n \in [10, 100]$.

The true target pattern was generated in the form:

$$y(m, n) = 10^5 + m^3 \cdot n^2 + \varepsilon,$$

where ε is a normal noise with a standard deviation of 1 % from the mean of the regression model on the experimental input data. The structural identification algorithm was given a redundant representation of nine candidate basis functions: basis $m^3, n^2, \ln m$, their squares, and all possible

pairwise products. The algorithm's task was to automatically find the true pattern.

The results of applying the LSM to unscaled data led to erroneous final results: due to the imbalance of the orders of magnitude of the functions, the algorithm demonstrated instability at the stage of structural identification. When dividing into clusters, the algorithm gave false preference to basis functions with small numerical values, mistakenly selecting as the only main basis function (cluster M_1) a function $\ln m$ with a coefficient of $\sim 1.4126 \cdot 10^9$. At the same time, the algorithm perceived the true dominant term $m^3 \cdot n^2$ as secondary noise and sent it to the residual representation M_2 with a coefficient of 1.0019. Structurally, the model was identified absolutely incorrectly, which makes further analysis of complexity impossible.

Instead, the application of pre-scaling of the input data significantly improved the result. The LSM correctly determined the weights of each function in the total variance, which allowed the algorithm to identify the structure without error. The only true basis function $m^3 \cdot n^2$ was automatically selected for the main representation cluster (M_1). The resulting model took the following form:

$$y(m, n) = 1.2046 \cdot 10^5 + 1.0006 \cdot (m^3 \cdot n^2). \quad (5)$$

The terms of the residual representation M_2 and the shift in this case act exclusively as insignificant compensators of the imposed noise. Therefore, the synthetic criterion took the minimum value on the correct structure of the regression model (5). In this example, the following modification of the criterion for selecting the final solution was used: all partial representations were considered, for which the values of the symmetric criterion practically do not differ from the minimum, and from them the partial representation was selected, which contains the minimum number of basis functions. The resulting estimates of the unknown coefficients were found for the entire set of experimental data and practically do not differ from the coefficients of the ideal model.

5. Simulation modeling of input data for finding the empirical complexity function of the simplex method using the MGMDH. Having confirmed the efficiency of the methodology, the MGMDH was applied to objectively verify the empirical formula for the computational complexity of the standard simplex method. For the empirical analysis, random LP problems were generated according to the rules described in Section 2.

To ensure statistical reliability of the results, five series of independent simulation experiments were conducted for each of the two samples (estimating data for each of the models using the LSM and data of the validation subset used to select the best empirical formula from the six candidates found). The values of m (the number of constraints) and n (the number of variables) varied from 200 to 2000 with a step of 50. For each combination of m and n values, five independent LP problems were generated. Thus, the total number of generated and solved problems in one series of tests was $37 \cdot 37 \cdot 5 \cdot 2 = 13690$. For each

solved problem, the exact number of arithmetic operations performed by the simplex method was recorded.

To implement the structural identification procedure, a redundant representation was formed based on five fundamental theoretical estimates: the earlier proposed by the authors general mixed model without considering the constant ($f_{\text{general}} = 0.63m^{2.96}n^{0.02} \log^{1.62} n + 4.04m^{-4.11}n^{2.92}$), the Adler-Megiddo model ($f_{\text{Adler}} = n^4$) [8], the refined Borgwardt model ($f_{\text{Borg}} = m^3n^2$) [9], the basic polynomial model ($f_{\text{poly}} = mn$) [10], and the smoothed analysis model ($f_{\text{smooth}} = mn^5 \ln n$) [11]. In order to increase the reliability of the verification of the obtained model, the search space was expanded by introducing logarithmic components, namely, supplemented with an additive logarithmic function $f_{\text{log}} = \ln m + \ln n$.

This allowed us to form a set of partial representations from the class of complex polynomial-logarithmic functions, which additively includes six basis functions, their squares, and pairwise products.

Thus, the total number of residual terms is equal to $M = 27$ candidate arguments. Considering the cardinality of the set M_1 , which is equal to $M_{11} \cap M_{12}$ (each of which is found by its own validation subset), the set of all partial representations is equal to $2^{27} - 1 \approx 1.34 \cdot 10^8$ models, which practically guarantees finding the correct structure of the empirical formula for the complexity of the simplex method within the given residual representation.

The choice of selected basis functions, instead of elementary arguments such as m, n , is due to the multiplicative nature of the interaction of the number of constraints and variables. Since the total complexity is derived from the product of the number of iterations times the complexity of one iteration of the simplex method, any correct estimate of the complexity of the simplex method must consider this physical logic of the algorithm.

To increase the estimation objectivity, as indicated above, a symmetric regularity criterion was used, which requires dividing the test sample into two independent parts: a training subset T and a validation subset V . The algorithm works according to a two-step scheme: first, the estimates of the coefficients of partial representations are found by the sample T and the residual sum of squares of each partial representation is found by the sample V ($T \cap V$ is an empty set, $T \cup V$ is the set of all test data, the cardinality of the sets T and V is the same); then the procedure is repeated when T performs the functions of the validation subset, and V is used to find the estimates of the coefficients of partial representations (from which the validity of the formula $M_1 = M_{11} \cap M_{12}$ follows).

6. Identification results. As a result of using the symmetric regularity criterion, it was found that the above formulated criterion for selecting the correct structure of the partial representation gave the following result: from the set of partial representations, for each of which the values of the symmetric regularity criterion practically do not differ

from the minimum, a partial representation with the minimum number of basis functions from the partial representation is selected. Estimates of the unknown coefficients of the selected partial representation are found for the entire set of test data. Thus, the resulting empirical formula for the number of arithmetic operations of the simplex method as a function has the form:

$$\begin{aligned}
 y(m, n) \approx & 3.2705 \cdot 10^8 + \\
 & + 1.0045 \cdot f_{\text{general}} + 1.58 \cdot 10^8 \cdot f_{\log}^2 + 1.97 \cdot 10^{-22} \cdot f_{\text{Borg}}^2 - \\
 & - 1.13 \cdot 10^{-2} \cdot f_{\text{poly}}^2 - 4.49 \cdot 10^{-6} \cdot f_{\text{Adler}} f_{\log} - \\
 & - 1.53 \cdot 10^9 \cdot f_{\log} - 2.35 \cdot 10^{-4} \cdot f_{\text{Borg}} - 2.38 \cdot 10^{-17} \cdot f_{\text{Borg}} + \\
 & + 1.69 \cdot 10^{-5} \cdot f_{\text{Borg}} f_{\log} - 6.17 \cdot 10^{-12} \cdot f_{\text{Borg}} f_{\text{poly}} + \\
 & + 7.10 \cdot 10^{-10} \cdot f_{\text{smooth}} - 2.51 \cdot 10^5 \cdot f_{\text{poly}} - \\
 & - 5.47 \cdot 10^{-9} \cdot f_{\text{poly}} f_{\text{Adler}} + 1.88 \cdot 10^4 \cdot f_{\text{poly}}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

It should be noted separately that there is a free term (shift) in the obtained model, which is about $3.2705 \cdot 10^8$. From the point of view of classical asymptotic analysis of algorithms, a constant term does not affect the complexity class with infinite growth of dimensionality. However, in the context of applied resource estimation problems, this parameter carries information about the fixed overhead of the algorithm [12]. Considering this shift is critically important for accurate prediction of the number of operations on problems of small and medium dimensionality ($m \leq 500, n \leq 600$), where asymptotic terms are not yet dominant. It is for these restrictions that it is possible to use a simplified formula:

$$\begin{aligned}
 y(m, n) \approx & 3.2705 \cdot 10^8 + 1.0045 \cdot 0.63m^{2.96} n^{0.02} \log^{1.62} n + \\
 & + 4.04m^{-4.11} n^{2.92}.
 \end{aligned}$$

Conclusions. 1. We set the problem of finding the correct empirical formula for the number of arithmetic operations of the simplex method for LP problems given in the canonical form of medium complexity (the number of equations does not exceed 500, the number of variables does not exceed 600).

2. We give a justification for a residual representation, to which belongs the structure of the sought empirical formula for the number of arithmetic operations of the simplex method belongs.

3. We chose the MGMDH as a method for finding the empirical complexity formula. The method was adapted for the case when the residual representation is linear with respect to unknown coefficients and nonlinear with respect to given basis functions.

4. As a result of the algorithm, we found an empirical formula for the number of arithmetic operations of the simplex method for LP problems of medium dimensionality (the number of equations does not exceed 500, the number of variables does not exceed 600).

5. We provided a qualitative interpretation of the sense of the constant included in the resulting empirical formula for the number of arithmetic operations of the simplex method.

Declaration on the use of generative AI. The authors did not use any generative artificial intelligence tools in the preparation of this manuscript.

References

1. Pavlov A., Lishchuk K., Melnikov O., Kyselov M., Hu C. Mathematics and software for coordinated planning using aggregated linear volume-time models of discrete manufacturing systems. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. 2025. Vol. 17. No. 4. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2025.04.01>.
2. Pavlov A. A., Kushch A. V. Algorithms for constructing a regression linear with respect to unknown coefficients on a limited amount of experimental data. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПИ». 2025. № 2 (14). С. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2025.02.02>.*
3. Dadush D., Huiberts S. Smoothed analysis of the simplex method. *Beyond the Worst-Case Analysis of Algorithms* / Ed. by T. Roughgarden, Cambridge University Press. 2021. P. 309–333. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108637435.019>.
4. Павлов О. А., Головченко М. М., Дрозд В. В., Шаргородський В. С. Підвищення ефективності модифікованого методу урахування аргументів для побудови багатовимірних регресій, заданих надлишковим описом. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2025. Т. 1, № 46. С. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.46.2025.323833>.
5. Marquardt D. W., Snee R. D. Ridge regression in practice. *The American Statistician*. 1975. Vol. 29, No. 1. P. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.1975.10479105>.
6. Ahsan M. M., Mahmud M. A. P., Saha P. K., Gupta K. D., Siddique Z. Effect of data scaling methods on machine learning algorithms and model performance. *Technologies*. 2021. Vol. 9, No. 3. P. 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9030052>.
7. Moroz O. H., Stepashko V. S. Comparative features of MIA GMDH and deep feed-forward neural networks. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021. № 4 (206). P. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt206.04.005>.
8. Adler I., Megiddo N. A simplex algorithm whose average number of steps is bounded between two quadratic functions of the smaller dimension. *Journal of the ACM (JACM)*. 1985. Vol. 32. No. 4. P. 871–895. DOI: <https://doi.org/10.1145/4221.4222>.
9. Borgwardt K.-H. The average number of pivot steps required by the simplex method is polynomial. *Zeitschrift für Operations Research*. 1982. Vol. 26. No. 1. P. 157–177. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01917108>.
10. Klee V., Minty G. J. How good is the simplex algorithm? *Inequalities-III*. New York, Academic Press. 1972. P. 159–175.
11. Spielman D. A., Teng S. H. Smoothed analysis of algorithms: Why the simplex algorithm usually takes polynomial time. *Journal of the ACM (JACM)*. 2004. Vol. 51. No. 3. P. 385–463. DOI: <https://doi.org/10.1145/990308.990310>.
12. Voulgaropoulou S., Samaras N., Ploskas N. Predicting the execution time of the primal and dual simplex algorithms using artificial neural networks. *Mathematics*. 2022. Vol. 10. P. 1038. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10071038>.

References (transliterated)

1. Pavlov A., Lishchuk K., Melnikov O., Kyselov M., Hu C. Mathematics and software for coordinated planning using aggregated linear volume-time models of discrete manufacturing systems. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. 2025, vol. 17, no. 4, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2025.04.01>.
2. Pavlov A. A., Kushch A. V. Algorithms for constructing a regression linear with respect to unknown coefficients on a limited amount of experimental data. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii: zb. nauk. prats* [Bulletin of the National Technical

- University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology: Collection of scientific papers]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025, no. 2 (14), pp. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2025.02.02>.
3. Dadush D., Huiberts S. Smoothed analysis of the simplex method. *Beyond the Worst-Case Analysis of Algorithms* / Ed. by T. Roughgarden, Cambridge University Press Publ., 2021, pp. 309–333. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108637435.019>.
 4. Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V., Shargorodskiy V. S. Pivvyshchennia efektyvnosti modyfykovanoho metodu urakhuvannia arhumentiv dlia pobudovy bahatovymirykh rehresii, zadanykh nadlyshkovym opysom [Improving efficiency of the modified group method of data handling for constructing multivariate regressions given by a redundant representation]. *Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia* [Adaptive systems of automatic control]. 2025, vol. 1, no. 46, pp. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.46.2025.323833>. (In Ukr.).
 5. Marquardt D. W., Snee R. D. Ridge regression in practice. *The American Statistician*. 1975, vol. 29, no. 1, pp. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.1975.10479105>.
 6. Ahsan M. M., Mahmud M. A. P., Saha P. K., Gupta K. D., Siddique Z. Effect of data scaling methods on machine learning algorithms and model performance. *Technologies*. 2021, vol. 9, no. 3, p. 52. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9030052>.
 7. Moroz O. H., Stepashko V. S. Comparative features of MIA GMDH and deep feed-forward neural networks. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2021, no. 4 (206), pp. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt206.04.005>.
 8. Adler I., Megiddo N. A simplex algorithm whose average number of steps is bounded between two quadratic functions of the smaller dimension. *Journal of the ACM (JACM)*. 1985, vol. 32, no. 4, pp. 871–895. DOI: <https://doi.org/10.1145/4221.4222>.
 9. Borgwardt K.-H. The average number of pivot steps required by the simplex method is polynomial. *Zeitschrift für Operations Research*. 1982, vol. 26, no. 1, pp. 157–177. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01917108>.
 10. Klee V., Minty G. J. How good is the simplex algorithm? *Inequalities-III*. New York, Academic Press Publ., 1972, pp. 159–175.
 11. Spielman D. A., Teng S. H. Smoothed analysis of algorithms: Why the simplex algorithm usually takes polynomial time. *Journal of the ACM (JACM)*. 2004, vol. 51, no. 3, pp. 385–463. DOI: <https://doi.org/10.1145/990308.990310>.
 12. Voulgaropoulou S., Samaras N., Ploskas N. Predicting the execution time of the primal and dual simplex algorithms using artificial neural networks. *Mathematics*. 2022, vol. 10, p. 1038. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10071038>.

Received 25.03.2026

Accepted 17.04.2026

Published 20.05.2026

УДК 004:519.24:681.3.06

О. А. ПАВЛОВ, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, професор кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: alexanderpavlov1944@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

М. Є. КИСЕЛЬОВ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, бакалавр кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: zeusmobilenick@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3686-3419>

ВЕРИФІКАЦІЯ ЕМПІРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНОСТІ СИМПЛЕКС-МЕТОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОГО МГУА

Наведено результати побудови емпіричної залежності кількості арифметичних операцій стандартного симплекс-методу як функції від розмірності задачі, заданої в канонічній формі. Для розв'язання проблеми застосовано принцип самоорганізації моделей на основі модифікованого комбінаторного алгоритму методу групового урахування аргументів. Модифікація методу групового урахування аргументів полягає у формуванні залишкового опису, в якому припускається міститись шукана емпірична функція складності та використання алгоритму попереднього розбиття базисних функцій, з яких адитивно складається залишковий опис, на два класи, що не перетинаються: клас головних домінуючих компонент та клас уточнюючих залишкових компонент, що дозволяє суттєво скоротити процедуру комбінаторного перебору. На основі відомих з літератури теоретичних оцінок складності сформовано надлишковий опис базисних функцій. До розгляду включено п'ять фундаментальних моделей: поліноміальну оцінку Боргвардта, квадратичну межу Адлера-Мегіддо, базову поліноміальну форму, модель згладженого аналізу Спілмана-Тенга та загальну змішану модель, раніше запропоновану авторами. З метою розширення простору пошуку, до базисних функцій було додано логарифмічну компоненту. Таким чином, залишковий опис адитивно містить шість базисних компонент та всі їх квадрати та попарні добутки. Відбір оптимальної структури здійснено за симетричним критерієм регулярності шляхом перебору понад 134 мільйонів альтернативних моделей, кількість яких однозначно задається потужністю множини уточнюючих залишкових компонент. Для забезпечення коректного використання методу найменших квадратів для суттєво нелінійних регресорів різного масштабу (абсолютні значення яких відрізняються на багато порядків), експериментально обґрунтовано необхідність масштабування вхідних даних на їхнє стандартне відхилення з неонов'язковим застосуванням процедури центрування. Ефективність такого підходу підтверджено на спеціально розробленому експерименті із закладенням ідеального розв'язком, наявністю вільного члена (зсуву) на рівні 100000 та нормальним шумом з амплітудою 1 % від середнього значення ідеальної регресії на значеннях вхідних змінних експерименту. Результати імітаційного моделювання на вибірці з 13690 випадково згенерованих задач лінійного програмування доводять беззаперечну перевагу змішаної поліноміально-логарифмічної структури у розширеному класі функцій-претендентів.

Ключові слова: симплекс-метод, самоорганізація моделей, модифікований метод групового урахування аргументів, метод найменших квадратів, надлишковий опис, критерій регулярності, стандартизація даних.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Павлов Олександр Анатолійович / Pavlov Alexander Anatolievich

Автор 2 / Author 2: Кисельов Микита Євгенович / Kyselov Mykyta Yevhenovych

УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.03

UDC 004.8:519.816:004.9

O. V. IVASHCHENKO, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine; e mail: oksana.ivashchenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-3914>

S. FILIP, Eng., Ph.D., Associate Professor, Bratislava University of Economics and Management, Bratislava, Slovakia; e mail: stanislav.filip@vsemba.sk; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3000-9383>

N. R. YURIEV, Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: Nikita.Yuriev@cs.khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1966-245X>

FUZZY LOGIC IN DORMITORY ACCOMMODATION RECOMMENDATION SYSTEMS: ACCOUNTING FOR UNCERTAINTY AND LINGUISTIC STUDENT PREFERENCES

The problem of student dormitory room allocation is considered as a multi-criteria decision-making task under uncertainty. The relevance of the study is driven by the need to improve the quality of accommodation processes through intelligent recommendation approaches that account for individual student preferences, rather than relying on simple filtering mechanisms. The aim of the paper is to develop a recommendation model that evaluates the suitability of dormitory rooms based on both quantitative characteristics and subjective user preferences. To achieve this goal, a fuzzy logic approach is applied to model the linguistic nature of user requirements and to handle uncertainty in decision-making. The proposed model calculates partial compatibility scores for multiple criteria, including price, distance, comfort, noise level, and social compatibility, and aggregates them into an overall suitability measure for each student–room pair. The effectiveness of the approach is evaluated by comparing it with the Simple Additive Weighting method, used as a baseline. The results show that the fuzzy logic-based approach provides more differentiated and flexible recommendations, better representing diverse student preferences and improving the quality of ranking alternatives. The analysis of score distributions shows that the fuzzy logic approach yields a smoother, more continuous range of compatibility values, whereas the additive weighting method tends to produce clustered scores, reducing the ability to distinguish between alternatives. The proposed method can be used as a decision-support tool in dormitory management systems to enhance allocation efficiency and user satisfaction.

Keywords: fuzzy logic, multi-criteria decision making, dormitory allocation, student preferences, recommendation system, social compatibility, additive weighting method.

Introduction. The management of student accommodation in dormitories is an essential part of campus operations that directly affects student satisfaction, the quality of the educational environment, and the efficient use of campus resources. Despite the growing digitalization of higher education, many institutions still rely on manual or semi-automated room allocation procedures that require significant administrative effort and often fail to adequately account for individual student preferences [1], [2].

To improve decision-making in such environments, universities increasingly adopt intelligent information systems and personalized recommendation approaches. Recommender systems enable the generation of accommodation suggestions based on user preferences and contextual factors, thereby improving the quality of the user experience and adaptation [1], [3].

The dormitory room selection process involves multiple criteria, including budget constraints, room capacity, distance to the university, comfort level, noise conditions, and social compatibility. Many of these criteria are subjective and are naturally expressed in linguistic terms such as

“moderately priced”, “quiet environment”, or “not too many roommates”, which makes it difficult to use deterministic approaches based on strict thresholds.

In this context, fuzzy logic provides an effective framework for representing uncertainty and modeling linguistic preferences in multi-criteria decision-making problems [4], [5]. Therefore, developing a fuzzy-logic-based recommendation component for dormitory accommodation becomes a timely and relevant task to improve the personalization, interpretability, and quality of student housing decisions.

Literature review. Most existing dormitory management systems concentrate on routine administrative tasks and offer little support for intelligent decision-making. University accommodation systems typically support application processing, document management, and status tracking, but do not provide personalized room recommendations based on student preferences [6].

Commercial accommodation platforms, such as INGEK, HousingAnywhere, Student.com, and UniAcco, provide filtering by price, location, and room characteris-

© Ivashchenko O. V., Filip S., Yuriev N. R., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



tics; however, their recommendation mechanisms usually rely on direct filtering rather than multi-criteria decision support [7]–[10]. Similar limitations can also be observed in local web-based dormitory solutions [11].

Regarding methodological approaches, multi-criteria decision-making methods, such as the Simple Additive Weighting method, are widely used because of their transparency and computational simplicity. However, such approaches require precise numerical inputs and assume linear relationships between criteria, which limits their applicability in situations involving subjective or linguistic preferences [12], [13].

Data-driven and clustering-based approaches have also been applied to recommendation problems [2], [14]. While they can be effective with large datasets, their interpretability is often limited, which reduces their usefulness in real decision-support settings.

Fuzzy logic provides a flexible and interpretable framework for modeling uncertain and linguistically expressed user preferences in multi-criteria environments [4], [5]. At the same time, optimization approaches, including genetic algorithms, have proven effective for solving related allocation problems under constraints [15], [16].

Therefore, existing dormitory systems do not adequately combine personalized preference modeling, social compatibility assessment, and interpretable multi-criteria evaluation. This motivates the development of the proposed fuzzy-based recommendation approach.

Problem Statement. The problem of student accommodation selection can be formulated as a multi-criteria decision-making problem under uncertainty, in which the degree of suitability between students and available dormitory rooms must be evaluated based on individual preferences and room characteristics.

Let d denote the set of students, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ – the set of available rooms, and $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ – the set of evaluation criteria, which includes price, distance to the university, noise level, room capacity, comfort, renovation condition, and social compatibility. Each student provides their preferences for these criteria in linguistic terms (e.g., low price, quiet environment, moderate distance), which are subjective and cannot be directly encoded as precise numerical values; for example, an acceptable price level is “medium”. At the same time, each criterion is assigned a weight that reflects its relative importance for a particular student.

The central objective of the problem is to determine how well each room satisfies a given student’s preferences. This is achieved by calculating a compatibility score for each student–room pair:

$$F_{ij} = \sum_{l=1}^k w_{il} \cdot d_{ijl},$$

where l is the index of the criterion, w_{il} represents the importance of the criterion c_l for student s_i , and $d_{ijl} \in [0,1]$ denotes the partial compatibility of the room r_j with respect to this criterion. The values d_{ijl} are obtained using

fuzzy inference or rule-based evaluation depending on the criterion, which transform both linguistic preferences and quantitative room characteristics into a unified numerical scale.

Once the compatibility scores are computed, the recommendation task becomes a ranking problem. For each student, all available rooms are evaluated and ordered in descending order of F_{ij} , and this ordering forms a personalized list of recommended options. Such a formulation focuses on identifying the most suitable alternatives for each individual student rather than performing a global allocation of all students simultaneously.

The main challenge in this problem lies in processing heterogeneous and partially subjective criteria. For example, preferences such as an acceptable price level or desired comfort are inherently vague, and trade-offs between criteria (for example, lower price versus higher comfort) also complicate the evaluation process. These characteristics limit the effectiveness of classical linear and deterministic models.

To address these challenges, the proposed approach uses fuzzy logic to model uncertainty and linguistic preferences. The resulting compatibility scores offer an interpretable, flexible basis for generating personalized room recommendations. The obtained ranking can further serve as input to more advanced allocation models, which may be considered a direction for future research.

Method. The proposed method considers the problem of assigning students to dormitory rooms as a multi-criteria decision-making task under uncertainty. Each student is evaluated for all available rooms based on individual preferences and room characteristics, while the vagueness of human judgments is handled using fuzzy logic. Social compatibility is incorporated through an additional rule-based component.

Let $S = \{s_i\}$ denote the set of students and $R = \{r_j\}$ the set of available rooms. Each student s_i is described by a vector of preferences $\mathbf{P} = (p_{i1}, \dots, p_{ik})$ and a corresponding vector of weights $\mathbf{W}_i = (w_{i1}, \dots, w_{ik})$, where

$$\sum_{l=1}^k w_{il} = 1.$$

Each room r_j is described by a vector of parameters $\mathbf{X}_j = (x_{j1}, \dots, x_{jk})$, where x_{jl} represents the value of room r_j corresponding to criterion c_l .

For each pair (s_i, r_j) , the model computes partial scores $d_{ijl} \in [0,1]$, where index l corresponds to a specific criterion (e.g., price, distance, noise, comfort). These scores are obtained through fuzzy inference or rule-based evaluation, depending on the criterion. First, both student preferences and room parameters are transformed into linguistic variables using predefined membership functions (e.g., low, medium, high), typically represented by triangular or trapezoidal fuzzy sets. Then, Mamdani-type inference is applied using a rule base of the form:

IF room parameter is A
 AND preference is B
 THEN suitability is C.

The resulting fuzzy output is defuzzified using the centroid method, yielding a crisp value d_{ij} .

In addition to the considered criteria, the method incorporates a social compatibility component that reflects the feasibility of co-living among students. This covers aspects such as language, cultural background, and lifestyle preferences. For instance, language compatibility is evaluated not only by the presence of identical languages but also by students' ability to communicate through a shared language. English often serves as a common communication medium; therefore, in international dormitory environments. So, if two students do not share a native language but both can communicate in English, partial compatibility is assigned. Otherwise, compatibility is minimal. The resulting social score is denoted as $d_{soc} \in [0,1]$ and is treated as a partial score corresponding to the social compatibility criterion. Thus, social compatibility is incorporated into the model as an evaluation criterion and contributes to the overall compatibility score in the same manner as the other criteria.

The overall compatibility between student s_i and room r_j is computed by aggregating all partial scores using F_{ij} .

Thus, for each student, the method iteratively evaluates all available rooms by performing fuzzification, inference, defuzzification, and aggregation steps, storing the results in a matrix $F = [F_{ij}]$. Rooms are then ranked in descending order of F_{ij} , producing a personalized recommendation list.

The overall workflow of the method, including the stages of fuzzy evaluation and aggregation described, is illustrated in Fig. 1.

Results and Discussion. The experimental dataset was constructed based on domain expertise and direct communication with international and Erasmus students, which enabled the identification of the most relevant accommodation criteria and typical preference patterns for both short-term and long-term residents. This approach ensured that

the dataset reflects realistic decision-making scenarios and incorporates both quantitative room characteristics and subjective user preferences.

Three dormitories with different accommodation conditions were modelled to evaluate the behavior of the proposed approach under varying trade-offs between criteria. Dormitory A is located close to the university and is characterized by relatively low noise levels and moderate comfort. Dormitory B is farther away but offers better renovation conditions. Dormitory C is located in a central area, offering greater comfort but also higher prices and increased environmental noise. Such differentiation allows testing the model's sensitivity to conflicting criteria and realistic decision-making scenarios.

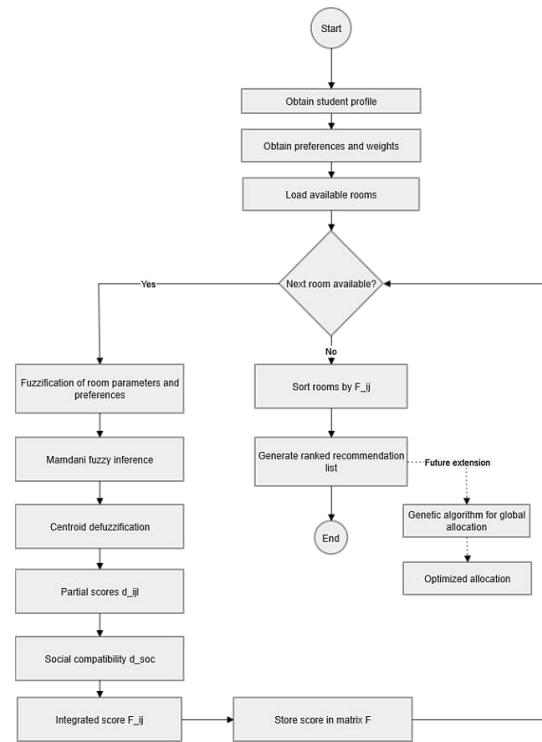


Fig. 1. Flowchart of the fuzzy-based room recommendation algorithm

In contrast to a flat dataset representation, the experimental data were organized according to the relational structure of the developed system. The dataset includes multiple interconnected tables describing students, their

Table 1 – Relational data used in the experiment

Table	Role in the experiment
USERS	Stores student profiles and social characteristics
STUDENT_PREFERENCES	Stores linguistic accommodation preferences
STUDENT_PREFERENCE_WEIGHTS	Stores individual criterion weights
HOSTELS	Describes dormitory-level characteristics
ROOMS	Stores room parameters used in recommendation
BEDS	Defines bed places within rooms
CURRENT_ASSIGNMENTS	Stores already occupied beds and current residents
MODEL_PARAMETERS	Stores model parameters for social compatibility
RECOMMENDATION_LOG / output file	Stores calculated scores and ranking results

preferences and weights, and dormitory and room characteristics. The main entities involved in the experiment and their roles are summarized in Table 1.

Such a structure allows separating static information (room parameters, dormitory characteristics) from dynamic user-specific data (preferences and weights), which is essential for evaluating the recommendation model.

The recommendation results were obtained by computing partial compatibility scores for each criterion and aggregating them into the final compatibility score – F_{ij} . In Table 2, d_{price} , d_{noise} , and d_{soc} denote normalized partial compatibility scores for the price criterion, noise level, and social compatibility, respectively, where each value belongs to the interval [0,1]. A fragment of the computed results is presented in Table 2, where each row corresponds to a specific student–room pair.

Table 2 – Fragment of calculated recommendation results

Student	Room	d_{price}	d_{noise}	d_{soc}	F_{ij}	Rank
Ayşe Demir	A101	0.500	0.790	0.575	0.732	1
Ayşe Demir	A103	0.500	0.790	0.500	0.727	2

To better understand the behavior of the proposed method, several representative student profiles were analyzed in detail. The selected students differ in their preference structures, allowing evaluation of the model under different decision-making scenarios. For example, some students demonstrate strong preferences for comfort and low noise levels, while others prioritize price or social compatibility. These differences in preference structures directly influence the resulting compatibility scores and ranking outcomes.

The results demonstrate that the proposed fuzzy-based method yields distinct compatibility scores across rooms, even when the initial parameters are similar. This is primarily due to the use of fuzzy inference, which captures gradual transitions between linguistic categories (e.g., “low”, “medium”, “high”) instead of relying on strict thresholds.

To further assess the effectiveness of the proposed approach and to better interpret the results, the outcomes were compared with those of the Simple Additive Weighting (SAW) method, which is widely used in multi-criteria decision-making problems due to its simplicity and interpretability. In SAW, all criteria are normalized and aggregated linearly using predefined weights, without explicitly modelling uncertainty or linguistic preferences. This makes SAW a suitable baseline for comparison with more advanced approaches [17].

In the SAW method, each criterion is first normalized to a comparable scale, taking into account its type (benefit or cost), after which the overall score is calculated as a weighted sum of criterion values. The same criteria and weights were used for both methods in this study to allow a fair comparison. The key distinction appears at the evaluation stage: the proposed approach uses fuzzy

inference, whereas SAW performs a direct weighted aggregation of numerical values.

A comparison with the SAW method reveals important differences in ranking behavior. While SAW often produces identical or very close scores for multiple alternatives, the fuzzy-based approach introduces additional sensitivity to variations in criteria values and better reflects subjective preferences. This effect is especially noticeable in cases where trade-offs between criteria are present.

The comparison in Table 3 shows that both methods yield similar results for students with clearly dominant preferences and homogeneous room characteristics. For instance, students such as Ayşe Demir and Luka Horvat receive nearly identical recommendations from both methods, which indicates that their preference structures clearly match the characteristics of the top-ranked rooms.

However, noticeable differences appear in more complex cases. In particular, for students such as Elif Kaya and Mehmet Arslan, the fuzzy-based method produces rankings that differ from those obtained using SAW. This can be explained by the structure of their preferences, in which no single criterion dominates and multiple trade-offs must be considered.

For example, Elif Kaya assigns relatively balanced importance to several criteria, including distance, noise, and comfort. In such cases, the fuzzy-based method captures partial satisfaction across multiple criteria, whereas SAW tends to favor alternatives with slightly higher normalized values, resulting in different rankings.

Table 3 – Comparison of top-ranked rooms using the Fuzzy method and SAW

Student	Method	Rank 1	Rank 2	Rank 3
Ayşe Demir	Fuzzy	A101	A103	A104
Ayşe Demir	SAW	A101	A103	A104
Elif Kaya	Fuzzy	A309	A310	A311
Elif Kaya	SAW	A303	A304	A305
Luka Horvat	Fuzzy	C308	C309	C310
Luka Horvat	SAW	C308	C309	C310
Mehmet Arslan	Fuzzy	B114	A113	A317
Mehmet Arslan	SAW	A317	A318	A319

Similarly, for Mehmet Arslan, the inclusion of the social compatibility component significantly influences the final ranking. The fuzzy-based method prioritizes rooms with better social matching, whereas SAW does not explicitly account for such relationships, leading to different top-ranked options.

In addition to individual comparisons, the overall behavior of the proposed method was analyzed based on the distribution of compatibility scores across all evaluated student–room pairs.

Fig. 2 illustrates the distribution of compatibility scores F_{ij} obtained for all evaluated student–room pairs. The majority of values fall between 0.68 and 0.71,

indicating the overall consistency of the evaluated accommodation options with student preferences.

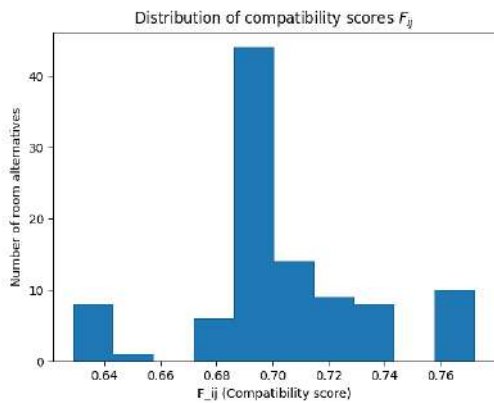


Fig. 2. Distribution of compatibility scores F_{ij} for all evaluated student-room pairs

At the same time, the presence of both lower and higher values indicates that the model can distinguish between less and more suitable alternatives. In particular, rooms with significantly higher scores (above 0.74) correspond to cases where multiple criteria are simultaneously well satisfied, while lower scores reflect partial mismatches in one or more criteria.

Such a distribution confirms that the proposed fuzzy-based approach provides a balanced evaluation of alternatives and avoids excessive clustering of results. This is especially important in recommendation scenarios, where small differences in scores determine the final ranking of options.

The fuzzy-based method and SAW method exhibit different score distributions (Fig. 3). The fuzzy-based method yields more concentrated compatibility scores in the middle range, whereas SAW produces several groups of values due to linear normalization and aggregation. This confirms that the proposed and baseline methods rank alternatives using different evaluation mechanisms.

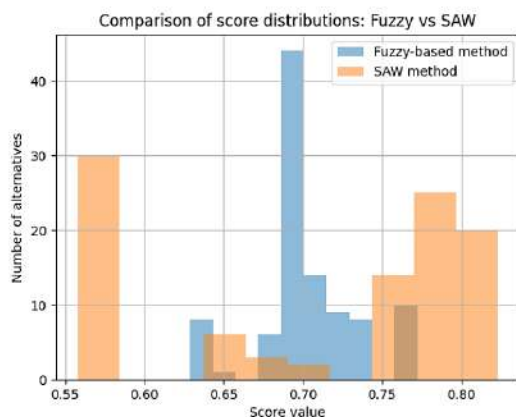


Fig. 3. Comparison of score distributions obtained using the fuzzy-based method and the SAW method

A more detailed analysis of Fig. 3 shows that the SAW method tends to produce several distinct clusters of scores, which is a direct consequence of linear normalization and

aggregation. As a result, multiple alternatives receive identical or nearly identical values, reducing the discriminative ability of the ranking.

In contrast, the fuzzy-based method produces a smoother and more continuous distribution of scores. This behavior reflects fuzzy inference's ability to model gradual transitions between preference levels and capture partial satisfaction of criteria. Consequently, the proposed approach provides a more nuanced differentiation between alternatives, which is particularly important in scenarios with closely competing options.

Overall, the experimental results demonstrate that the proposed fuzzy-based approach provides a more flexible and sensitive evaluation of accommodation alternatives compared to the SAW method. This is especially clear in situations with several trade-offs and subjective criteria, where handling uncertainty and partial preferences becomes important.

Conclusions. This study proposes a fuzzy-logic-based recommendation approach for selecting student dormitory rooms, formulated as a multi-criteria decision-making problem under uncertainty. The method allows the incorporation of both quantitative room characteristics and linguistically expressed subjective student preferences.

The developed model integrates fuzzy inference to evaluate partial compatibility across multiple criteria and includes a social compatibility component that reflects the feasibility of co-living among students. This allows the model to better reflect how students actually make decisions.

The results show that the proposed method produces more differentiated and interpretable rankings compared to the Simple Additive Weighting (SAW) method. While SAW tends to generate identical or closely grouped scores due to linear aggregation, the fuzzy-based approach captures gradual transitions between preference levels and accounts for partial satisfaction of criteria.

The comparison also shows that both methods provide similar results in cases with dominant criteria; however, significant differences arise in more complex scenarios involving multiple trade-offs and social factors. In such cases, the proposed approach demonstrates higher sensitivity to variations in input parameters and better reflects individual preferences.

Therefore, the proposed method can serve as an effective tool for personalized dormitory room recommendation. It may serve as a decision-support component within dormitory management systems, improving the quality of allocation decisions and user satisfaction.

Future research may focus on integrating the proposed recommendation model with global optimization techniques, such as genetic algorithms, to solve the full allocation problem under capacity constraints.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT and Grammarly for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text. After using these tools, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

1. Diyaolu A. M., Abodunrin O. B., Adedamola A. A., Ogunode R. S., Omoloba O. *Development of an e-based hostel management system*. Available at: <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IISRT24JUN147> (accessed: 10.12.2025). DOI: 10.38124/ijisrt/IISRT24JUN147.
2. Kadyan L., Jain M., Maheshwari P., Rai P. *AI-Enhanced Hostel Management and Booking System: An Intelligent Approach to Automating Accommodation Services in Educational Institutions*. Available at: <https://ijsdr.org/viewpaperforall.php?paper=IJSDR2504349> (accessed: 10.12.2025).
3. Ricci F., Rokach L., Shapira B. *Recommender Systems Handbook*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4> (accessed: 17.12.2025). DOI: 10.1007/978-1-0716-2197-4.
4. Zadeh L. A. *Fuzzy sets. Information and Control*. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X) (accessed: 18.12.2025). DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
5. Dubois D., Prade H. *Fundamentals of Fuzzy Sets*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4429-6> (accessed: 18.12.2025). DOI: 10.1007/978-1-4615-4429-6.
6. Strilets V., Holikov M. *Model of the computer system for settling students in a dormitory*. Available at: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-62-05> (accessed: 18.12.2025). DOI: 10.26565/2304-6201-2024-62-05.
7. *Hurtozhytky*. Available at: <https://ingek.com/uk/gurtozhytky/> (accessed: 19.01.2026).
8. *HousingAnywhere*. Available at: <https://housinganywhere.com/> (accessed: 19.01.2026).
9. *Student.com*. Available at: <https://www.student.com/> (accessed: 19.01.2026).
10. *UniAcco*. Available at: <https://uniacco.com/> (accessed: 04.02.2026).
11. *SEO Evolution*. Available at: <https://seo-evolution.com.ua/en> (accessed: 04.02.2026).
12. Voskoglou M. G. *Grey Multiple-Criteria Decision-Making*. Available at: <https://doi.org/10.52812/ijgs.88> (accessed: 05.02.2026). DOI: 10.52812/ijgs.88.
13. Afaq S.A., Dwivedi S., Faisal M., Jana S., Habiba U., Siddique M. *Enhancing Fuzzy Multi Criteria Decision Making Technique in Engineering Design Problem*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-77719-6_24 (accessed: 10.02.2026). DOI: 10.1007/978-3-031-77719-6_24.
14. Wang Y., Niu J. *Research on Data-Driven Student Personalized Learning Path Recommendation System*. Available at: <https://doi.org/10.1109/EESPE63401.2025.10987530> (accessed: 10.02.2026). DOI: 10.1109/EESPE63401.2025.10987530.
15. Chang C. C., Lin C. C. *Dormitory assignment using a genetic algorithm*. Available at: <https://doi.org/10.1080/08839514.2021.1999595> (accessed: 14.02.2026). DOI: 10.1080/08839514.2021.1999595.
16. Zhang L., Wang L., Dai Y., Chen Q., Shen J., Lin H. *Personalized dormitory roommate matching system based on multiple swarm genetic algorithms*. Available at: <https://dx.doi.org/10.23977/acss.2024.080317> (accessed: 14.02.2026). DOI: 10.23977/acss.2024.080317.
17. Triantaphyllou E. *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6> (accessed: 17.02.2026). DOI: 10.1007/978-1-4757-3157-6.

Received 20.03.2026
Accepted 13.04.2026
Published 20.05.2026

УДК 004.8:519.816:004.9

О. В. ІВАЩЕНКО, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна; e-mail: oksana.ivashchenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3636-3914>
С. ФІЛІП, інженер, доктор філософії (PhD), доцент, Братиславський університет економіки та менеджменту, м. Братислава, Словаччина; e-mail: stanislav.filip@vsemba.sk; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3000-9383>
Н. Р. ЮР'ЄВ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, м. Харків, Україна; e-mail: Nikita.Yuriev@cs.khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1966-245X>

НЕЧІТКА ЛОГІКА В РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПОСЕЛЕННЯ В ГУРТОЖИТКАХ: УРАХУВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ЛІНГВІСТИЧНИХ УПОДОБАНЬ СТУДЕНТІВ

Задача розподілу студентів по кімнатах гуртожитку розглядається як задача багатокритеріального прийняття рішень в умовах невизначеності. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення якості процесів поселення за рахунок використання інтелектуальних рекомендаційних підходів, що враховують індивідуальні вподобання студентів, на відміну від простих механізмів фільтрації. Метою роботи є розроблення рекомендаційної моделі, яка оцінює придатність кімнат гуртожитку на основі як кількісних характеристик, так і суб'єктивних вподобань користувачів. Для досягнення цієї мети застосовано підхід нечіткої логіки для моделювання лінгвістичної природи вимог користувачів та врахування невизначеності в процесі прийняття рішень. Запропонована модель обчислює часткові оцінки сумісності за декількома критеріями, зокрема ціною, відстанню, комфортом, рівнем шуму та соціальною сумісністю, та агрегує їх у загальну міру придатності для кожної пари «студент–кімната». Ефективність підходу оцінюється шляхом порівняння з методом Simple Additive Weighting, який використовується як базовий. Результати показують, що підхід на основі нечіткої логіки забезпечує більш диференційовані та гнучкі рекомендації, краще відображає різноманітність уподобань студентів і підвищує якість ранжування альтернатив. Аналіз розподілу оцінок показує, що підхід нечіткої логіки формує більш гладкий і безперервний діапазон значень сумісності, тоді як метод адитивного зважування має тенденцію до утворення кластеризованих значень, що знижує здатність розрізняти альтернативи. Запропонований метод може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень у системах управління гуртожитками для підвищення ефективності розподілу та задоволеності користувачів.

Ключові слова: нечітка логіка, багатокритеріальне прийняття рішень, розподіл у гуртожитку, вподобання студентів, рекомендаційна система, соціальна сумісність, метод адитивного зважування.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Іващенко Оксана Віталіївна / Ivashchenko Oksana Vitaliivna
Автор 2 / Author 2: Філіп Станіслав / Filip Stanislav
Автор 3 / Author 3: Юр'єв Нікіта Романович / Yuriev Nikita Romanovich

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.04

UDC 519.2

M. M. SMOLENSKYI, PhD-Student, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: nikitasmolenskyi@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>

Ie. V. SIDENKO, PhD, Associate Professor, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine; e-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>

TRUSTED RFID EVENT MODELING FOR AUDIT, SECURITY, AND PROVENANCE IN PATIENT APPOINTMENT WORKFLOWS

This paper is devoted to the development and investigation of an approach to auditing, security, and provenance of RFID-based patient interactions within appointment-centered workflows in medical information systems. The paper analyzes the limitations of traditional RFID implementations in healthcare, which are typically focused on simple identifier retrieval and do not ensure contextual integrity, traceability, or verifiability of clinical actions, leading to risks related to inconsistent medical records and reduced reliability of appointment outcomes. The proposed solution treats RFID readings as trusted context-aware events embedded into the lifecycle of a patient appointment and forming a verifiable chain of clinical interactions. A formal model of a trusted RFID event is introduced, incorporating actor, temporal, spatial, and clinical context parameters, enabling its use as an atomic unit of audit and provenance. The approach establishes a relationship between RFID event chains and appointment results, where the outcome of a patient visit is derived from a sequence of validated and contextually consistent events rather than solely from declarative records. To ensure interoperability and standardized audit mechanisms, the proposed model is aligned with HL7 FHIR resources, including AuditEvent and Provenance, enabling representation of both event-level actions and their origins within a unified framework. A risk-based approach to RFID infrastructure security is incorporated, allowing differentiation of protection mechanisms depending on the criticality of clinical interactions. The client-server architecture of the medical information system is extended with event-driven server-side processing of RFID interactions, ensuring validation, authorization, and consistency of clinical workflows. The results demonstrate that the proposed approach improves auditability, traceability, and reliability of RFID-based patient appointment management compared to traditional identification-centric solutions, making it suitable for deployment in real healthcare environments requiring high levels of trust and accountability.

Keywords: RFID, patient identification, trusted events, audit, provenance, appointment workflows, healthcare information systems

Introduction. The ongoing digital transformation of healthcare systems has significantly increased the volume of medical data and the complexity of clinical workflows. Modern medical information systems are required not only to store and manage electronic health records but also to ensure the integrity, traceability, and accountability of clinical actions. Patient appointments represent a central organizational unit in such systems, structuring interactions between patients, healthcare professionals, and clinical processes. However, in many cases, the results of patient visits are still primarily based on declarative records entered by medical personnel, which may lack sufficient evidence of actual clinical actions and introduce risks related to human error, data inconsistency, and limited auditability [1, 2].

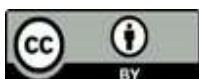
Radio Frequency Identification (RFID) technology has been widely adopted in healthcare as a solution for automated patient identification, asset tracking, and medication management. Compared to traditional barcode-based systems, RFID enables contactless identification, supports real-time data acquisition, and improves operational efficiency in dynamic clinical environments [3–5]. Recent studies show that RFID-based systems can

reduce medication errors, improve patient safety, and enhance workflow efficiency, particularly in high-load hospital settings [6, 7].

Despite these advantages, most existing RFID implementations in medical information systems are limited to simple identifier retrieval and access control. RFID tags are typically treated as static identifiers that provide access to patient data, while the interactions themselves are not interpreted as clinically meaningful events. As a result, RFID-based actions are rarely integrated into the logical structure of patient appointments and do not provide sufficient support for audit, provenance, or verification of clinical outcomes [8, 9].

At the same time, modern healthcare systems increasingly require mechanisms that ensure traceability, data provenance, and accountability of clinical processes, especially in the context of patient safety and regulatory compliance. Standards such as HL7 FHIR introduce structured representations for audit trails and provenance, including resources such as AuditEvent and Provenance, which enable tracking of actions and their origins within healthcare systems [10, 11]. However, the integration of real-time identification technologies such as RFID with

© Smolenskyi M. M., Sidenko Ie. V., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



these standardized models remains insufficiently explored, particularly in the context of appointment-centered workflows and verification of clinical outcomes [12, 13].

This paper addresses the identified gap by proposing an approach in which RFID interactions are treated as trusted, context-aware events embedded within the lifecycle of patient appointments. In the proposed model, each RFID interaction contributes to a verifiable chain of events that supports audit, provenance, and validation of appointment outcomes. This enables a transition from declarative recording of clinical results to their evidence-based verification, improving the reliability, traceability, and accountability of medical information systems in real healthcare environments.

Related works and problem statement. Reliable patient identification is a fundamental requirement for ensuring safety and quality in healthcare delivery. In modern clinical environments, identification processes are tightly integrated with various stages of patient care, including admission, diagnosis, treatment, and follow-up. Failures in identification can lead to serious consequences such as incorrect medication administration, duplication of medical records, delays in treatment, and clinical decision errors. As healthcare systems become increasingly digital and interconnected, the need for robust and scalable identification mechanisms continues to grow, especially in high-load environments where multiple interactions occur simultaneously [14, 15].

Traditional identification methods, including manual verification and barcode-based systems, have contributed to improving standardization and reducing certain types of human error. However, these approaches remain dependent on direct interaction, line-of-sight scanning, and correct user behavior, which limits their effectiveness in dynamic and time-critical clinical workflows. In addition, barcode systems are susceptible to physical damage and often require repeated scanning, which may introduce delays and reduce usability in practice [16, 17].

Radio Frequency Identification (RFID) technology has emerged as a promising alternative, enabling contactless identification and real-time data acquisition in healthcare environments. RFID systems allow automatic detection of tags without the need for direct line-of-sight and support simultaneous identification of multiple entities, including patients, medical staff, equipment, and medications. These capabilities contribute to improved workflow efficiency, reduced manual workload, and enhanced situational awareness within clinical settings [18, 19].

Recent studies highlight the growing adoption of RFID in various healthcare applications, including patient tracking, medication administration, and asset management. In particular, RFID-based systems have been shown to reduce identification-related errors, improve compliance with clinical procedures, and support automation of routine tasks. Furthermore, integration of RFID with mobile devices and hospital information systems enables seamless access to patient data and facilitates real-time decision-making by healthcare professionals [20, 21].

At the same time, the effectiveness of RFID systems depends on multiple technical and organizational factors, including tag placement, environmental conditions, reader

configuration, and system integration. Challenges such as signal interference, reading accuracy, and infrastructure costs may affect system performance and limit large-scale deployment in certain healthcare settings. Nevertheless, ongoing advancements in RFID technology and its integration with digital health infrastructures continue to expand its potential as a key component of modern medical information systems [22, 23].

Despite widespread RFID use in healthcare, most systems remain limited in scope and integration. Tags are typically used as static identifiers for record access or simple actions, reducing interactions to basic lookups without clinical context. As a result, RFID events are treated as isolated technical operations rather than meaningful clinical events, limiting their role in validation, reasoning, and higher-level decision-making [24, 25].

This issue is critical in appointment-centered workflows, where identification is part of a sequence of clinical steps. The same RFID action is used for admission, examination, medication, or discharge, each requiring different rules and context. Yet many systems process them uniformly, ignoring context. This loses semantic meaning, weakens workflow control, and increases the risk of errors or misinterpretation. Another critical issue is the lack of contextual awareness in RFID data processing. Reliable interpretation requires factors like actor identity and role, location, appointment state, and intended action. However, most systems ignore this context, relying only on identifier matching, which limits validation and increases the risk of inappropriate or unauthorized operations in complex clinical environments [26].

From an architectural perspective, traditional RFID systems rely on synchronous request–response models, where each identification triggers an immediate server call. While simple, this limits scalability and flexibility. In high-load environments like hospitals, it can cause bottlenecks, higher latency, and reduced responsiveness. It also complicates multi-stage workflows requiring asynchronous processing, event correlation, and coordination across distributed components [27].

Beyond scalability issues, synchronous models create tightly coupled architectures where identification logic, business rules, and UI are interdependent. This reduces maintainability and makes it hard to adapt to new workflows, integrations, or regulations. As healthcare systems become more distributed and interoperable, these limitations grow increasingly problematic [24].

Another limitation is weak support for auditability and traceability. RFID interactions are often treated as transient and not stored in a structured, context-rich form. Even when logged, they lack detail to reconstruct who did what, under which conditions, and in what clinical context. This complicates incident analysis, compliance verification, and quality assurance processes [28].

Moreover, the lack of explicit links between identification events and higher-level clinical constructs, such as appointments or treatment episodes, further limits traceability. Without this linkage, it is hard to verify whether recorded outcomes match the actual sequence of actions. This gap between data and verifiable evidence is a critical weakness of many medical systems and undermines trust in digital health records [28].

Current RFID systems offer limited support for data provenance, as they rarely capture the full chain of actions leading to a clinical outcome. This makes it hard to assess data reliability, detect inconsistencies, or trace errors. The issue is especially critical in complex, multi-actor, distributed workflows, where tracing data to its origin is key for accountability and trust [25].

The limitations of existing RFID systems highlight the need for a different model that goes beyond simple identifier-based access and includes contextual, verifiable, and traceable representations of clinical interactions. Identification should be treated not as an isolated operation but as part of clinical workflows, linked to appointments and outcomes. This requires viewing RFID interactions as structured, context-aware events that reflect real actions and support reliable audit and verification.

In this approach, each RFID interaction is a trusted, context-rich event (actor, location, time, clinical stage), forming an atomic unit in a verifiable chain of actions within an appointment. Identification becomes evidence of interaction rather than just access.

Linking events to appointments provides context, enabling scenario differentiation and context-specific rules like role-based access, location constraints, and workflow conditions, improving safety and correctness [29].

Trusted events enable building verifiable chains of clinical interactions, where each action links to previous ones within an appointment. Outcomes are derived not as declarations but from validated event sequences, making them evidence-based. This increases reliability of medical records and supports accountability, especially in critical scenarios like medication administration or invasive procedures [30].

To ensure interoperability and standardization, the model aligns with HL7 FHIR. RFID trusted events map to resources like AuditEvent (actions) and Provenance (data origin and history), enabling consistent representation of event chains and their links to clinical entities such as appointments and encounters. This supports both internal processing and compliant data exchange within a unified framework [31].

Another key aspect is a risk-based approach to RFID processing. Clinical actions differ in criticality, so they require different validation levels. For example, check-in may need minimal checks, while medication or treatment actions require stricter controls like multi-factor verification and enhanced auditing. Embedding risk awareness allows the system to adapt its behavior, ensuring appropriate security and reliability [32].

Event-based RFID representation improves auditability, traceability, and analysis. Each interaction is a structured, context-rich event, enabling reconstruction of the full action sequence within an appointment. This supports incident investigation, quality assurance, and compliance by revealing workflow deviations and root causes. Unlike traditional logs, it provides a coherent, semantically meaningful view of clinical processes [30].

Overall, a trusted event-based RFID model enables more reliable, transparent, and accountable healthcare systems. Linking identification events to appointment workflows and deriving outcomes from validated event

chains addresses key limitations and supports next-generation systems focused on safety, traceability, and trust.

Trusted RFID event model for appointment-centered clinical traceability. The limitations of RFID identification in healthcare call for a shift from viewing interactions as isolated technical operations to modeling them as part of clinical workflows. Traditional systems treat RFID as a means to retrieve identifiers and grant access, ignoring its role within broader care processes.

In practice, identification occurs within structured workflows, especially patient appointments, where each interaction (admission, examination, medication, discharge) is context-dependent and contributes to outcomes. Yet most systems fail to link identification events to this context, creating a gap between recorded data and actual clinical practice.

This gap affects the reliability of appointment outcomes, which are often recorded as assumed actions rather than verifiable ones. Without links to traceable events, it is hard to assess data integrity, audit processes, or investigate incidents.

To address this, a trusted event-based RFID model is proposed, centered on patient appointments as the core context. Each interaction is treated as a structured, context-aware event representing a clinical action, enriched with attributes like actor, location, time, and purpose for proper interpretation within an appointment.

A core principle is that trust in clinical data must be established, not assumed. RFID interactions become trusted events only after validation of integrity, context, and rule compliance, turning them into reliable evidence rather than transient signals.

Patient appointments act as containers that organize events into coherent workflows. Events within an appointment form a sequence reflecting the visit's progression, providing a basis for deriving outcomes from verifiable evidence rather than assumptions.

The approach shifts from identifier-centric, access-based models to an evidence-based view of clinical interactions, where RFID events ensure traceability, accountability, and data reliability. By formalizing context-aware identification events, it enables integration of RFID into healthcare systems while supporting efficiency and clinical trust.

To achieve consistent and verifiable interpretation, the model defines a trusted event as a structured entity combining identification data with clinical context. This allows RFID interactions to act as atomic units of clinical activity, forming the basis for audit, traceability, and outcome validation.

A trusted RFID event is defined as a tuple:

$$E = \{uid, t, actor, role, loc, ctx, appointment_id\}, \quad (1)$$

where *uid* represents the unique identifier associated with the patient's RFID tag; *t* denotes the timestamp of the interaction; *actor* identifies the entity (e.g., healthcare professional or device) initiating the event; *role* specifies the clinical role of the actor, such as physician, nurse, or technician; *loc* (location) describes the spatial context in

which the interaction occurs; *ctx* (context) represents the clinical intent of the action (e.g., appointment confirmation, examination, medication administration); and *appointment_id* links the event to a specific patient appointment, providing the primary contextual framework for its interpretation.

Contextual parameters distinguish this model from identifier-centric ones, enabling a semantically rich view of interactions. The *appointment_id* is key, linking each event to a specific visit, allowing identical RFID actions to be interpreted differently depending on context and supporting context-aware validation.

An RFID event is not inherently trustworthy; trust is derived from completeness, consistency, and alignment with clinical context. It becomes trusted only if it answers core accountability questions (who, patient, where, when, process), shifting RFID from passive identification to evidence generation.

The model also supports composability: trusted events form ordered sequences reflecting appointment progression. These preserve temporal and contextual links, enabling workflow reconstruction and analysis, and serving as a basis for event chains and appointment outcomes.

Formalizing RFID interactions as trusted events supports integration with interoperability standards and audit frameworks. Structured events with defined attributes align with audit logging and provenance tracking, enabling consistent mapping to standardized clinical actions and ensuring compatibility and extensibility within healthcare ecosystems.

Overall, the model provides a formal foundation for interpreting identification as verifiable clinical actions. By enriching events with context and linking them to appointments, it shifts from identifier-based access to evidence-based processing, supporting traceability, accountability, and reliability in modern healthcare systems.

In this model, an RFID interaction is not immediately trusted; trust is derived through validation and contextualization. Raw identification alone is insufficient, so each interaction passes through stages that establish its validity and clinical meaning.

The first stage is structural validation, which checks completeness and consistency of essential attributes (identifier, timestamp, actor). It ensures the event meets format requirements but does not interpret its meaning.

Next is contextual validation, where the system evaluates the event against clinical context (actor role, location, appointment state). This distinguishes identical actions under different conditions and ensures only contextually valid events proceed.

The next stage is constraint and policy validation, where domain rules and organizational policies (role-based, temporal, workflow-specific) determine if the action is allowed. Separating this from contextual validation keeps the model flexible and extensible.

After passing validation, the event becomes eligible for clinical interpretation and is mapped to a specific action within the appointment workflow. It is no longer a technical signal but a representation of a real clinical interaction, enabling alignment with actual clinical practices.

The final stage is persistence and traceability, where the event and its validation outcome are stored in a structured log. This preserves each interaction as evidence for audit, workflow reconstruction, and incident analysis, unlike traditional transient identification actions.

Thus, transforming an RFID interaction into a trusted clinical event is a multi-stage process ensuring technical correctness and clinical validity. Explicitly modeling these stages provides a clear, reproducible mechanism for trust formation across clinical scenarios.

The overall validation and trust formation process is shown in Fig. 1.

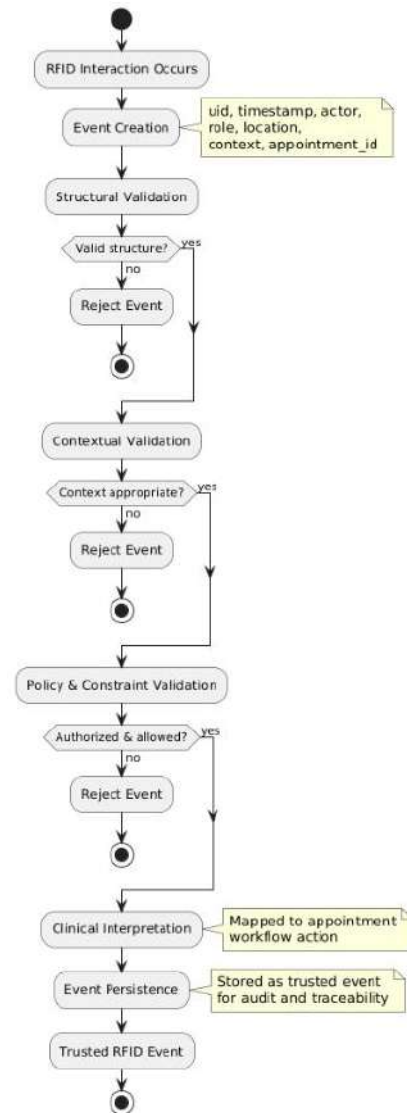


Fig. 1. Stages of validation and trust formation for RFID-based clinical events within appointment-centered workflows

While the formalization of RFID interactions as trusted events provides a foundation for representing clinical actions, the full semantic value of these events emerges only when they are interpreted within a structured clinical context. In the proposed approach, such a context is defined by the patient appointment, which serves as the primary organizational unit for grouping, interpreting, and validating events. This appointment-centered perspective

enables the transformation of isolated interactions into coherent representations of clinical workflows.

A patient appointment is a bounded episode of care involving interactions such as identification, examination, diagnostics, treatment, and follow-up. Linking each RFID event to a specific appointment provides context, allowing events to be interpreted both individually and in relation to others within the same process.

The integration of trusted RFID events into appointment-centered workflows is shown in Fig. 2.

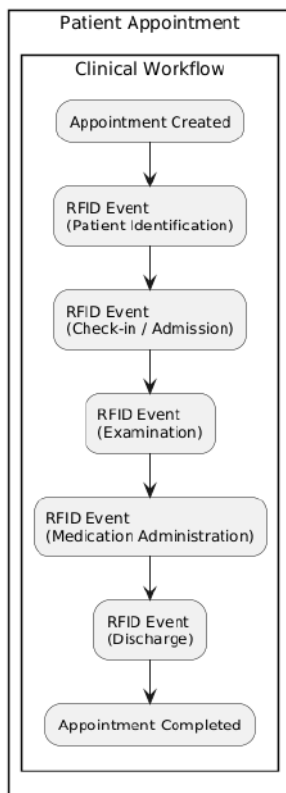


Fig. 2. Integration of trusted RFID events into appointment-centered clinical workflows

The `appointment_id` attribute is key, linking each event to a specific visit and enabling contextual interpretation. This ensures identical RFID actions can have different meanings depending on the appointment. For example, a scan during admission differs clinically from one during medication, despite using the same mechanism.

Within the appointment-centered model, events are not processed in isolation but are interpreted as components of a broader workflow. The appointment acts as a container that organizes events into a structured sequence, reflecting the actual progression of the clinical process. This structure allows the system to enforce workflow-specific constraints, such as permissible transitions between stages of care, required actions, and dependencies between events. As a result, the system can detect inconsistencies, prevent invalid operations, and ensure that clinical processes follow defined rules.

Another important aspect of this integration is the ability to correlate events across multiple actors and locations within the same appointment. In real healthcare

scenarios, a single patient visit may involve several healthcare professionals and multiple departments. By associating all relevant events with a shared appointment context, the system enables a unified view of the clinical process, facilitating coordination, communication, and comprehensive analysis of performed actions.

The appointment-centered model also provides a basis for linking RFID events with higher-level clinical entities and outcomes. Since each event is contextualized within a specific visit, it becomes possible to evaluate not only individual actions but also their collective contribution to the overall result of the appointment. This establishes a direct connection between low-level identification interactions and high-level clinical semantics, bridging the gap between technical data acquisition and meaningful clinical interpretation.

While individual trusted RFID events provide a reliable representation of atomic clinical actions, their full value is realized when they are considered as part of a structured sequence within a patient appointment. In the proposed model, events associated with a specific appointment are organized into event chains, which reflect the temporal and logical progression of clinical interactions. These chains serve as a bridge between low-level identification events and high-level clinical outcomes, enabling a consistent and verifiable interpretation of patient visits.

An event chain represents an ordered sequence of trusted RFID events linked by a common appointment context. Each event in the chain corresponds to a specific action performed during the visit and is enriched with contextual attributes that allow it to be interpreted within the workflow. The ordering of events is primarily determined by temporal relationships, but it is also influenced by clinical logic, such as dependencies between actions and permissible transitions within the workflow.

The concept of event chains enables the system to move beyond isolated event processing toward a holistic representation of clinical processes. Instead of evaluating individual interactions independently, the system can analyze the entire sequence of actions associated with an appointment. This makes it possible to assess whether the performed actions are consistent, complete, and aligned with expected clinical procedures.

The relationship between RFID event chains and appointment outcomes is illustrated in Fig. 3.

Within this framework, the outcome of a patient appointment is no longer treated as a purely declarative record but as a result derived from a sequence of validated events. Each outcome is supported by an underlying chain of actions that can be reconstructed, verified, and analyzed. This establishes a direct link between recorded clinical data and the actual interactions that occurred during the visit, significantly improving the reliability and credibility of medical records.

The use of event chains also enables the detection of inconsistencies and anomalies in clinical workflows. For example, if a required action is missing from the sequence, or if events occur in an invalid order, the system can identify such deviations and flag them for further review. This capability is particularly important in safety-critical

scenarios, where incomplete or incorrect workflows may lead to adverse outcomes.

Another important advantage of this approach is its support for post-event analysis and audit. Since each event in the chain is recorded as a structured and contextualized entity, it becomes possible to reconstruct the entire appointment process with a high degree of detail. This allows healthcare organizations to investigate incidents, verify compliance with clinical protocols, and assess the quality of care provided.

Furthermore, the event chain model provides a foundation for integrating advanced analytical and decision-support mechanisms. By analyzing patterns of events across multiple appointments, the system can identify trends, detect potential risks, and support optimization of clinical workflows. This extends the role of RFID from a passive identification technology to an active component of data-driven healthcare systems.

Overall, the introduction of event chains transforms the interpretation of RFID interactions from isolated technical signals into a coherent and verifiable representation of clinical processes. By linking appointment outcomes to sequences of trusted events, the proposed model establishes a foundation for evidence-based clinical data, enhancing traceability, accountability, and trust in healthcare information systems.

While the proposed trusted event-based model provides a conceptual and formal framework for interpreting RFID interactions within appointment-centered workflows, its practical value depends on the ability of a system to support and reflect this model in real-world operation. In this context, the implementation of a medical information system serves not as the primary contribution, but as a validation that the proposed approach can be effectively realized and integrated into everyday clinical processes.

In the developed system, patient appointments are represented as central entities that organize clinical interactions and serve as containers for trusted RFID events. All interactions involving patient identification are implicitly or explicitly associated with a specific appointment, ensuring that events are never processed in isolation. This design enables consistent contextualization of actions and aligns system behavior with the conceptual model described in previous sections.

The practical representation of the proposed model, including the interaction between appointments, RFID events, and system components, is illustrated in Fig. 4.

Within the system, trusted RFID events are reflected through changes in the state of domain entities, such as patients, appointments, and clinical actions. For example, an identification event associated with a scheduled appointment may trigger a transition from a “planned” to an “active” state, while subsequent events contribute to the progression and eventual completion of the visit. This demonstrates that RFID interactions are not merely recorded but actively influence the lifecycle of clinical processes.

The system interface provides a visual representation of these processes, allowing users to observe and manage appointments, patient data, and associated interactions. However, the interface itself does not define the logic of event processing; instead, it reflects the underlying event-based model. This separation ensures that the interpretation of RFID events remains consistent regardless of the client interface used, supporting heterogeneous environments that include web applications, mobile devices, and RFID-enabled readers.

Another important aspect of the implementation is the persistent storage of events and their outcomes. Each trusted RFID event, along with its contextual attributes and processing result, is recorded as part of a structured data

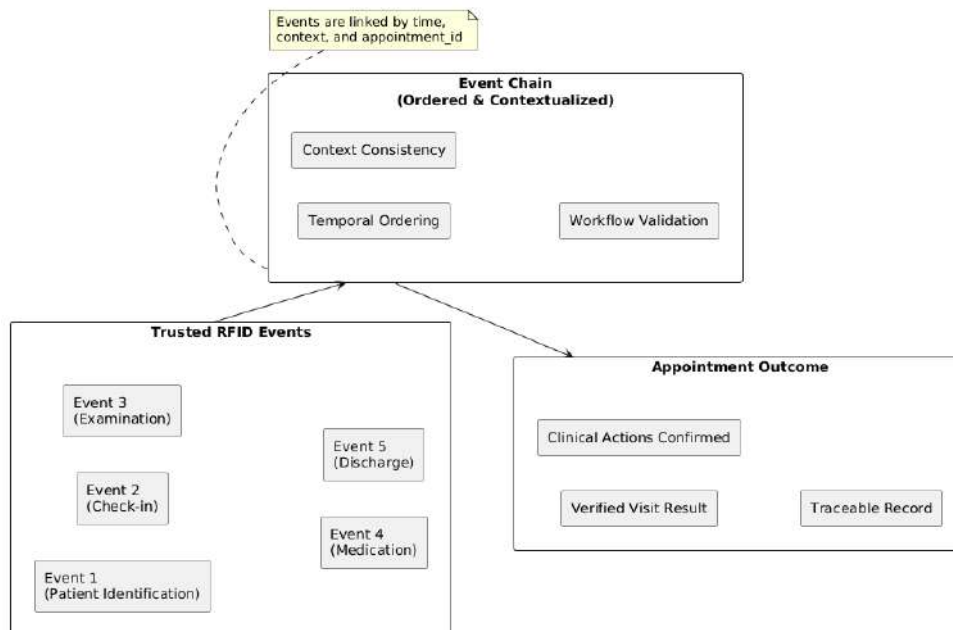


Fig. 3. Formation of appointment outcomes based on chains of trusted RFID events

model. This enables full traceability of clinical interactions and supports audit and analysis of appointment workflows. By maintaining a detailed history of events, the system provides a reliable basis for reconstructing clinical processes and verifying the correctness of recorded outcomes.

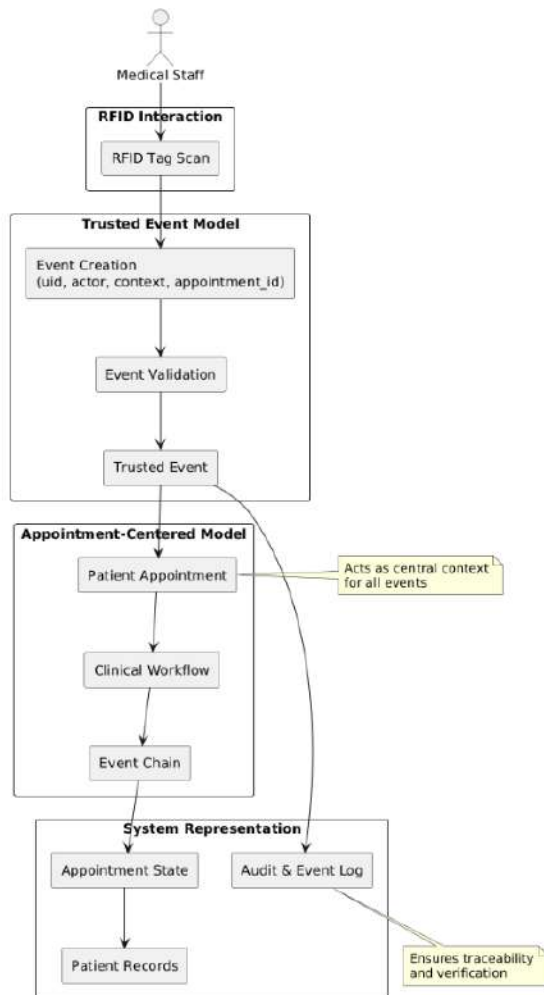


Fig. 4. Practical representation of appointment-centered workflows and trusted RFID event integration in a medical information system

The integration of trusted events into appointment-centered workflows also enables consistent synchronization between different system components. Changes triggered by RFID interactions are propagated across the system, ensuring that all representations of clinical data remain aligned. This is particularly important in distributed environments, where multiple users and systems may interact with the same patient data simultaneously.

Overall, the practical implementation confirms that the proposed trusted event-based model can be effectively applied within a medical information system, providing a coherent link between identification technologies and clinical workflows. By ensuring that RFID interactions are interpreted, validated, and recorded as context-aware events within patient appointments, the system supports traceability, accountability, and evidence-based representation of clinical outcomes.

The proposed trusted event-based model, together with its practical representation, demonstrates a consistent and extensible approach to integrating RFID-based identification into appointment-centered clinical workflows. By redefining RFID interactions as structured, context-aware, and verifiable events, the model overcomes the limitations of traditional identifier-centric approaches and enables a deeper integration of identification processes into the semantic structure of healthcare information systems. This shift allows identification to be interpreted not merely as a technical operation, but as a clinically meaningful action that contributes to the overall outcome of a patient appointment.

A key contribution of the proposed approach lies in the explicit linkage between RFID events and patient appointments, which serve as the primary contextual framework for interpreting clinical interactions. This appointment-centered perspective ensures that events are not processed in isolation but are embedded within coherent workflows that reflect real-world clinical processes. As a result, identical identification actions can be interpreted differently depending on their context, enabling more precise validation, improved safety, and greater alignment with clinical intent.

The introduction of a multi-stage validation process further strengthens the reliability of the model by ensuring that only structurally correct, contextually appropriate, and policy-compliant events are considered trusted. This approach establishes a clear mechanism for trust formation, transforming raw identification data into evidence that can be used for audit, verification, and decision-making. In contrast to conventional systems, where trust is often implicitly assumed, the proposed model provides an explicit and reproducible process for establishing the validity of clinical interactions.

Another important aspect of the model is the concept of event chains, which enables the representation of patient appointments as sequences of interrelated actions. By organizing trusted events into ordered chains, the system can capture the temporal and logical structure of clinical workflows, supporting both real-time validation and retrospective analysis. This allows appointment outcomes to be derived from verifiable evidence rather than declarative assumptions, significantly enhancing the reliability and credibility of medical records.

From a system perspective, the practical implementation confirms that the proposed model can be effectively realized within a medical information system without introducing excessive complexity. The separation between event generation, validation, contextual interpretation, and persistence ensures flexibility and scalability, while the use of appointment-centered modeling provides a consistent structure for integrating diverse clinical interactions. The system interface, in turn, serves as a reflection of the underlying model, demonstrating that the proposed approach can be seamlessly incorporated into real-world workflows and user environments.

Furthermore, the model supports key requirements of modern healthcare systems, including traceability, accountability, and auditability. By representing RFID interactions as persistent and context-rich events, the

system enables detailed reconstruction of clinical processes and facilitates post-incident analysis, compliance verification, and quality assessment. This capability is particularly important in safety-critical environments, where the ability to verify performed actions is essential for ensuring patient safety and maintaining trust in digital health systems.

Overall, the presented approach establishes a coherent conceptual and practical framework for transforming RFID-based identification into a foundation for evidence-based clinical data processing. By linking trusted events with appointment-centered workflows and deriving outcomes from structured event chains, the model provides a scalable and reliable solution for integrating identification technologies into modern healthcare information systems.

Conclusions. This work addresses reliability, traceability, and verifiability of patient-related interactions, highlighting limitations of conventional RFID systems that treat interactions as simple identifier retrieval without context or links to clinical processes. This reduces data integrity, auditability, and reliable validation of appointment outcomes.

To address this, a trusted event-based RFID model is proposed, centered on patient appointments as the main clinical context. RFID interactions are treated as structured, context-aware events representing atomic clinical actions, enriched with attributes such as actor, role, location, time, and appointment link.

A key contribution is a multi-stage validation process, where events become trusted only after structural, contextual, and policy checks. This provides a reproducible way to transform raw identification into verifiable clinical evidence and supports a shift from access-based to evidence-based data processing.

Another key aspect is integrating trusted RFID events into appointment-centered workflows. Linking each event to a specific appointment provides consistent context, enables differentiation of similar actions under different conditions, and enforces workflow-specific constraints, improving safety and alignment with real clinical practice.

Event chains extend this by representing appointments as sequences of related actions. Outcomes are derived from validated, consistent event chains rather than declarations, linking results to evidence and improving reliability, transparency, and credibility of medical data.

Practical implementation confirms applicability in real systems. Trusted events integrate into appointment management, workflows, and data storage without excessive complexity. Separation of representation, validation, and interpretation ensures flexibility, scalability, and consistency across components.

The results show the approach provides a strong basis for next-generation healthcare systems focused on traceability, accountability, and trust. By redefining RFID identification as a source of verifiable clinical events, it improves patient safety, supports audit and compliance, and enables more reliable digital representations of clinical processes.

Future work may extend the model with advanced event correlation, real-time analytics, and decision-support integration, as well as alignment with standards like HL7 FHIR for audit and provenance. Further research may

explore use in distributed, large-scale environments, including mobile platforms and Internet of Medical Things, enhancing robustness and adaptability of appointment-centered, event-driven systems.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT for language editing, text refinement, and assistance in structuring the manuscript, as well as Grammarly for grammar and spell checking. After using these tools, the authors reviewed, edited, and validated all content and take full responsibility for the content of this publication.

References

1. Choudhury L. S., Vu C. T. Patient Identification Errors: A Systems Challenge. PSNet [Internet]. *Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality*, 2020. Available at: <https://psnet.ahrq.gov/web-mm/patient-identification-errors-systems-challenge> (accessed 10.03.2026).
2. World Health Organization. Global patient safety action plan 2021–2030: towards eliminating avoidable harm in health care. *Geneva: World Health Organization*, 2021. 86 p.
3. Want R. An Introduction to RFID Technology. *IEEE Pervasive Computing*. 2006, vol. 5, no. 1, pp. 25–33. DOI: 10.1109/MPRV.2006.2.
4. Yao W., Chu C.-H., Li Z. The Use of RFID in Healthcare: Benefits and Barriers. *Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. on RFID-Technology and Applications*. 2010, pp. 128–134. DOI: 10.1109/RFID-TA.2010.5529874.
5. Haddara M., Staaby A. RFID Applications and Adoptions in Healthcare: A Review on Patient Safety. *Procedia Computer Science*. 2018, vol. 138, pp. 80–88. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.012.
6. Ajami S., Rajabzadeh A. Radio Frequency Identification (RFID) Technology and Patient Safety. *Journal of Research in Medical Sciences*. 2013, vol. 18, no. 9, pp. 809–813.
7. Abugabah A., Nizamuddin N., Abuqabbeh A. A Review of Challenges and Barriers Implementing RFID Technology in the Healthcare Sector. *Procedia Computer Science*. 2020, vol. 170, pp. 1003–1010. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.094.
8. Rosenbaum B. P. Radio Frequency Identification (RFID) in Health Care: Privacy and Security Concerns Limiting Adoption. *Journal of Medical Systems*. 2014, vol. 38, no. 3, article 19. DOI: 10.1007/s10916-014-0019-z.
9. Tiplea F. L. Security and Privacy Requirements for RFID Schemes in Healthcare: Case Studies, Solutions, and Challenges. *Procedia Computer Science*. 2024. DOI: 10.1016/j.procs.2024.09.494.
10. HL7 International. AuditEvent – FHIR v4.0.1 [Internet]. Available at: <https://www.hl7.org/fhir/R4/auditevent.html> (accessed 10.03.2026).
11. HL7 International. Provenance – FHIR v4.0.1 [Internet]. Available at: <https://www.hl7.org/fhir/R4/provenance.html> (accessed 10.03.2026).
12. Dal Mas F., Massaro M., Ripa P., Secundo G. The Challenges of Digital Transformation in Healthcare: An *Interdisciplinary Literature Review, Framework, and Future Research Agenda*. *Technovation*. 2023, vol. 123, article 102716. DOI: 10.1016/j.technovation.2023.102716.
13. Rahmani A. M., Babaei Z., Souri A. Event-Driven IoT Architecture for Data Analysis of Reliable Healthcare Application Using Complex Event Processing. *Cluster Computing*. 2021, vol. 24, pp. 1347–1360. DOI: 10.1007/s10586-020-03189-w.
14. Riplinger L., Piera-Jiménez J., Pursley Dooling J. Patient Identification Techniques: Approaches, Implications, and Findings. *Yearbook of Medical Informatics*. 2020, vol. 29, no. 1, pp. 81–86. DOI: 10.1055/s-0040-1701984.
15. ECRI. Top 10 Patient Safety Concerns 2021 [Internet]. 2021. Available at: <https://www.ecri.org/top-10-patient-safety-concerns-2021> (accessed 10.03.2026).
16. Dehzangi O., Taherisadr M., ChangaVala R. IMU-Based Gait Recognition Using Convolutional Neural Networks and Multi-Sensor Fusion. *Sensors*. 2017, vol. 17, no. 12, article 2735. DOI: 10.3390/s17122735.
17. Kusuda K., Yamashita K., Morishita E., Ishibashi N., Shiraishi Y., Yamaguchi H. Comparison of Reading Times of RFID-Tagged and Barcode-Engraved Surgical Instruments. *Journal of Surgical*

- Research. 2024, vol. 304, pp. 121–125. DOI: 10.1016/j.jss.2024.09.087.
18. Profetto L., Gherardelli M., Iadanza E. Radio Frequency Identification (RFID) in Health Care: Where Are We? *A Scoping Review. Health and Technology*. 2022, vol. 12, no. 5, pp. 879–891. DOI: 10.1007/s12553-022-00696-1.
 19. Abugabah A., Al Smadi A., Houghton L. RFID in Health Care: A Review of the Real-World Application in Hospitals. *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 220, pp. 8–15. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.004.
 20. Luschi A. Exploring Radio Frequency Identification (RFID) in Healthcare: Promises Fulfilled or Forsaken? *Technology and Health Care*. 2024, vol. 32, no. 4, pp. 2847–2849. DOI: 10.3233/THC-231784.
 21. Raso E., Bianco G. M., Bracciale L., Marrocco G., Occhiuzzi C., Loreti P. Privacy-Aware Architectures for NFC and RFID Sensors in Healthcare Applications. *Sensors*. 2022, vol. 22, no. 24, article 9692. DOI: 10.3390/s22249692.
 22. Marjamaa R. A., Torkki P. M., Torkki M. I., Kirvelä O. A. Time Accuracy of a Radio Frequency Identification Patient Tracking System for Recording Operating Room Timestamps. *Anesthesia & Analgesia*. 2006, vol. 102, no. 4, pp. 1183–1186.
 23. Khan M. A., Ullah S., Ahmad T., Jawad K., Buriro A. Enhancing Security and Privacy in Healthcare Systems Using a Lightweight RFID Protocol. *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 12, article 5518. DOI: 10.3390/s23125518.
 24. Li S., Xu L. D., Zhao S. The Internet of Things: A Survey. *Information Systems Frontiers*. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 243–259. DOI: 10.1007/s10796-014-9492-7.
 25. Pimenta N., Chaves A., Sousa R., Abella A., Peixoto H. Interoperability of Clinical Data through FHIR: A Review. *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 220, pp. 856–861. DOI: 10.1016/j.procs.2023.03.115.
 26. Gubert L. C., da Costa C. A., Righi R. R. Context Awareness in Healthcare: A Systematic Literature Review. *Universal Access in Information Society*. 2020, vol. 19, pp. 245–259. DOI: 10.1007/s10209-019-00664-z.
 27. Pautasso C., Zimmermann O., Leymann F. RESTful Web Services vs. "Big" Web Services: Making the Right Architectural Decision. *Proc. of the 17th Int. Conf. on World Wide Web (WWW 2008). Beijing, 2008*, pp. 805–814. DOI: 10.1145/1367497.1367606.
 28. Fernández-Alemán J. L., Carrión Señor I., Oliver Lozoya P. A., Toval A. Security and Privacy in Electronic Health Records: A Systematic Literature Review. *Journal of Biomedical Informatics*. 2013, vol. 46, no. 3, pp. 541–562. DOI: 10.1016/j.jbi.2012.12.003.
 29. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017*, pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
 30. Radanliev P., De Roure D., Page K., Nurse J. R. C., Mantilla Montalvo R., Santos O., Maddox L., Burnap P. Cyber Risk at the Edge: Current and Future Trends on Cyber Risk Analytics and Artificial Intelligence in the Industrial Internet of Things and Industry 4.0 Supply Chains. *Cybersecurity*. 2020, vol. 3, no. 1, article 13. DOI: 10.1186/s42400-020-00052-8.
 31. Mandel J. C., Kreda D. A., Mandl K. D., Kohane I. S., Ramoni R. B. SMART on FHIR: a standards-based, interoperable apps platform for electronic health records. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2016, vol. 23, no. 5, pp. 899–908. DOI: 10.1093/jamia/ocv189.
 32. Joint Task Force. Risk Management Framework for Information Systems and Organizations: A System Life Cycle Approach for Security and Privacy. *NIST Special Publication 800-37 Rev. 2* [Internet]. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology, 2018. Available at: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/37/r2/final> (accessed 10.03.2026). DOI: 10.6028/NIST.SP.800-37r2.

Received 14.03.2026

Accepted 06.04.2026

Published 20.05.2026

УДК 519.2

М. М. СМОЛЕНСЬКИЙ, аспірант, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна; e-mail: nikitasmolenskyi@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>

Є. В. СІДЕНКО, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна; e-mail: ievgen.sidenko@chmnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>

МОДЕЛЮВАННЯ ДОВІРЕНИХ RFID-ПОДІЙ ДЛЯ АУДИТУ, БЕЗПЕКИ ТА ПОХОДЖЕННЯ ДАНИХ У ПРОЦЕСАХ ВІЗИТІВ ПАЦІЄНТІВ

Ця робота присвячена розробці та дослідженню підходу до аудиту, безпеки та відстеження походження даних (provenance) RFID-взаємодій із пацієнтами в рамках процесів, орієнтованих на візити, у медичних інформаційних системах. У статті проаналізовано обмеження традиційних реалізацій RFID у сфері охорони здоров'я, які зазвичай зводяться до простого зчитування ідентифікатора та не забезпечують контекстної цілісності, трасованості та верифікованості клінічних дій, що призводить до ризиків, пов'язаних із неузгодженістю медичних записів і зниженням надійності результатів візитів. Запропоноване рішення розглядає RFID-зчитування як довірені контекстно-орієнтовані події, інтегровані в життєвий цикл візиту пацієнта та такі, що формують верифікований ланцюг клінічних взаємодій. Запроваджено формальну модель довіреної RFID-події, яка включає параметри актора, часу, просторового та клінічного контексту, що дозволяє використовувати її як атомарну одиницю аудиту та відстеження походження даних. У роботі встановлюється зв'язок між ланцюгами RFID-подій та результатами візитів, де підсумок відвідування пацієнта формується на основі послідовності валідованих і контекстно узгоджених подій, а не виключно на основі декларативних записів. Для забезпечення інтероперабельності та стандартизованих механізмів аудиту запропонована модель узгоджується зі стандартами HL7 FHIR, зокрема ресурсами AuditEvent і Provenance, що дозволяє представляти як окремі дії, так і їх походження в межах єдиної уніфікованої моделі. У підході також реалізовано ризик-орієнтований підхід до забезпечення безпеки RFID-інфраструктури, що дозволяє диференціювати механізми захисту залежно від критичності клінічних взаємодій. Архітектура медичної інформаційної системи розширена за рахунок подієво-орієнтованої серверної обробки RFID-взаємодій, що забезпечує валідацію, авторизацію та узгодженість клінічних процесів. Отримані результати демонструють, що запропонований підхід покращує аудитуваність, трасованість і надійність управління візитами пацієнтів на основі RFID порівняно з традиційними рішеннями, орієнтованими лише на ідентифікацію, що робить його придатним для впровадження в реальних медичних інформаційних системах із високими вимогами до довіри та підзвітності.

Ключові слова: RFID, ідентифікація пацієнта, довірені події, аудит, відстеження походження даних, процеси візитів пацієнтів, медичні інформаційні системи

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Смоленський Микита Михайлович / Smolenskyi Mykyta Mykhailovych

Автор 2 / Author 2: Сіденко Євген Вікторович / Sidenko Ievgen Viktorovych

- В. Є. СОКОЛ**, кандидат технічних наук (PhD), доцент, науковий співробітник дослідницької групи з навчальних технологій Рейнсько-Вестфальського технічного університету Аахена, RWTH Aachen University, Templergraben 55, 52062 Aachen, Deutschland; e-mail: sokol@informatik.rwth-aachen.de; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>
- Д. О. ГУРТ**, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: denys.hurt@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3880-9081>
- М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ**, доктор технічних наук, професор, директор інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: Mykhailo.Hodlevskiy@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>
- А. А. ПАШНЕВ**, кандидат технічних наук (PhD), старший науковий співробітник, доцент кафедри «Інформаційні системи та технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: pashniev@email.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9150-6108>

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КОРПОРАТИВНИХ ЗНАТЬ ТА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОНТЕКСТУ ІТ-КОМПАНІЙ НА ЛОКАЛЬНІ КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Проведено параметризацію організаційного контексту ІТ-компанії (за масштабом, бізнес-моделлю, рівнем зрілості процесів, ресурсними обмеженнями) та структурну декомпозицію її корпоративних знань на чотири класи: технологічні, процесні, емпіричні та організаційні, з визначенням критеріїв належності до множини корпоративних знань (формалізованість, відчуженість від носія, повторна використовуваність). Локальні критерії якості – структурованість, керованість, передбачуваність, вимірюваність, адаптивність та оптимізованість – визначено як критерії оцінювання окремого процесу розробки програмного забезпечення, узгоджені з дев'ятьма атрибутами процесу моделі SPICE. Розроблено формалізовану тривірневу ієрархічну модель на базі методу аналізу ієрархій, яка встановлює кількісні взаємозв'язки між якістю окремого процесу розробки програмного забезпечення, його локальними критеріями та класами корпоративних знань з урахуванням організаційного контексту конкретної ІТ-компанії. Проведено обчислювальний експеримент для процесу ТЕС.2 «Визначення потреб та вимог зацікавлених сторін» у контексті середньої аутсорсингової компанії, який показав домінування емпіричних знань (43,4 % глобальної ваги) та обгрунтував їх пріоритетний розвиток. Аналіз чутливості підтвердив коректну реакцію ранжування при зміні контексту. Наукова новизна полягає у встановленні кількісної залежності між класами корпоративних знань та якістю окремого процесу розробки програмного забезпечення через локальні критерії якості з прив'язкою до атрибутів моделі SPICE. Практичне значення підходу полягає у заміні інтуїтивних рішень ІТ-менеджменту науково обгрутованим механізмом розподілу ресурсів на розвиток окремих класів корпоративних знань для цільового підвищення якості конкретних процесів розробки програмного забезпечення. Подальші дослідження передбачають урахування ресурсних обмежень та агрегацію оцінок окремих процесів в інтегральну якість процесу розробки програмного забезпечення.

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення, локальні критерії якості, корпоративні знання, організаційний контекст, модель SPICE, метод аналізу ієрархій, формалізація впливу.

Вступ. У сучасних умовах зростання складності ІТ-проектів забезпечення високої якості процесу розробки (ІР) програмного забезпечення (ІЗ) є критичним фактором успіху ІТ-компаній. Впровадження визнаних міжнародних стандартів і моделей зрілості (таких як ISO/IEC 33020 [1], CMMI (Capability Maturity Model Integration) [2], ISO/IEC/IEEE 12207 [3]) спрямоване на стандартизацію та оптимізацію виробничих процесів. Проте універсальні підходи часто виявляються недієвими через ігнорування організаційного контексту конкретної ІТ-компанії та недостатнє використання корпоративних знань (КЗ) [4, 5]. Відсутність формалізованих механізмів, які б дозволяли адаптувати вибір методів підвищення якості під специфіку ІТ-компанії з урахуванням накопиченого інженерного досвіду (Lessons Learned, патернів, метрик), призводить до формального застосування стандартів без відчутного підвищення якості ІР ІЗ. Тому формалізація впливу корпоративних знань та організаційного контексту на локальні критерії якості окремих процесів розробки ІЗ є актуальним науковим завданням, вирішення якого створить підґрунтя для розробки систем підтримки прийняття рішень при плануванні підвищення якості ІР ІЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематиці управління якістю та вдосконалення процесів програмної інженерії присвячено значну кількість сучасних досліджень, які свідчать про відсутність консенсусу щодо метрик якості процесу розробки ІЗ. Порівняльне дослідження [4] факторів успіху покращення процесів Software Process Improvement (SPI) показало, що організаційний контекст суттєво впливає на критичність окремих факторів SPI.

Ролі управління знаннями у підвищенні якості процесів розробки ІЗ присвячено роботи [6, 7]: у [6] проаналізовано взаємозв'язок між ініціативами управління знаннями та покращенням якості програмних процесів; у [7] запропоновано практики поєднання управління знаннями та управління якістю в ІТ-проєктах. Застосуванню методів багатокритеріального аналізу у програмній інженерії присвячено [8], де метод аналізу ієрархій (MAI) використано для пріоритизації критеріїв оцінювання програмних процесів і гнучких практик розробки.

Проблемі адаптації процесів до організаційного контексту присвячено [5, 9]: у [5] показано, що контекстуальні фактори змушують процеси еволюціонувати у гібриди, а у [9] формалізовано підхід до адаптації про-

© Сокол В. Є., Гурт Д. О., Годлевський М. Д., Пашнев А. А. 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



грамних процесів з урахуванням цілей проекту та контексту. У контексті декомпозиції знань комплексну таксономію когнітивних концепцій у програмній інженерії розроблено у [10], а роль неявних знань в ІТ-індустрії досліджено у [11] з використанням моделі SECI (Socialization, Externalization, Combination, Internalization) [12]. Фундамент формалізації моделей зрілості CMMI та SPICE (Software Process Improvement and Capability dEtermination) для управління якістю ПР ПЗ закладено у [13, 14].

Незважаючи на вагомні результати, у відомих підходах бракує комплексних моделей, які б встановлювали кількісний та структурний зв'язок між декомпонованими елементами корпоративних знань та локальними критеріями якості через призму конкретного організаційного контексту. Відсутність такої формалізації ускладнює обґрунтоване планування підвищення якості ПР ПЗ для конкретних умов ІТ-середовища.

Мета. Розробка формалізованої ієрархічної моделі, що визначає залежність якості окремого процесу розробки ПЗ від декомпонованих корпоративних знань через локальні критерії якості, узгоджені з атрибутами процесу моделі SPICE, з урахуванням організаційного контексту ІТ-компанії.

Формалізація та параметризація організаційного контексту ІТ-компанії. Вхідною точкою дослідження є система властивостей якості процесу розробки ПЗ, встановлена у [15]:

$$Q = f(St, Ma, Pr, Me, Ad, Op),$$

де *St* – структурованість (формалізованість);

Ma – керованість;

Pr – передбачуваність;

Me – вимірюваність;

Ad – адаптивність;

Op – оптимізованість.

У роботі перелічені властивості розглядаються як локальні критерії оцінювання окремого процесу, узгоджені з атрибутами моделі SPICE. Корпоративні знання виступають як інструмент впливу на ці локальні критерії, що формалізується далі через декомпозицію *Kn* на окремі класи та їх розміщення на рівні альтернатив ієрархічної моделі. Класифікацію ІТ-компаній за організаційними ознаками, яка слугує вхідною точкою для параметризації контексту, наведено у [16].

Під організаційним контекстом ІТ-компанії розуміється впорядкована множина статичних та динамічних характеристик, що визначають умови функціонування команд розробки та накладають обмеження на вибір методів управління [5, 9]. Множину параметрів контексту позначимо як $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$.

Базуючись на класифікації організаційних структур в ІТ [15, 16], виділимо базовий вектор ключових параметрів $C = \{S, T, M, R\}$, де *S* (Scale) – масштаб компанії (малі, середні, великі); *T* (Type) – тип бізнес-моделі (продуктові або сервісні/аутсорсингові); *M* (Maturity) – рівень зрілості процесів за шкалою CMMI [2] або SPICE [1]; *R* (Resources) – рівень ресурсних обмежень (жорсткі, помірні, гнучкі).

Кожен конкретний стан організаційного контексту $C^* = (s_0, t_0, m_0, r_0)$ визначає пріоритетність локальних критеріїв якості для оцінювання конкретного процесу в умовах ІТ-компанії [4, 5]. Наприклад, для малого аутсорсингового проекту з жорсткими ресурсними обмеженнями критичною є необхідність швидкої реакції на зміни вимог замовника, що підвищує вагу адаптивності (*Ad*). Таким чином, організаційний контекст *C* математично визначає вектор вагових коефіцієнтів локальних критеріїв якості для конкретного процесу розробки ПЗ.

Декомпозиція корпоративних знань ІТ-компанії. Для визначення ступеня впливу корпоративних знань на локальні критерії якості процесу необхідно окреслити межі цього поняття. Відповідно до класичної теорії організаційного знання [12], знання організації поділяються на два фундаментальні типи: явні (explicit) – ті, що можуть бути формалізовані, задокументовані та передані через формальні канали; та неявні (tacit) – ті, що існують у вигляді особистого досвіду, інтуїції та навичок індивідів.

У цій роботі під корпоративними знаннями розуміються виключно явні, формалізовані та доступні для повторного використання інформаційні активи компанії, які залишаються в її розпорядженні незалежно від зміни кадрового складу. Інформаційний актив належить до множини *K3* тоді і тільки тоді, коли він одночасно задовольняє три критерії: формалізованість (знання зафіксоване у документі, репозиторії або базі даних); відчуженість від носія (знання доступне організації незалежно від присутності конкретного співробітника); повторна використовуваність (знання може бути застосоване в нових проектах або ітераціях). Неявні знання, не задокументовані у корпоративних системах, у цій моделі належать до «експертного потенціалу» команди і не розглядаються як елемент керованих *K3*. Такий підхід узгоджується з результатами [11], де показано, що екстерналізація неявних знань у формалізовані артефакти є критичним механізмом організаційного навчання.

Проведемо структурну декомпозицію множини корпоративних знань: $Kn = \{Kn_{tech}, Kn_{proc}, Kn_{exp}, Kn_{org}\}$, де *Kn_{tech}* (технологічні знання) – задокументовані архітектурні рішення (ADR), репозиторії шаблонів коду, технологічні радари, бібліотеки внутрішніх компонентів; *Kn_{proc}* (процесні знання) – регламенти процесів, інструкції (SOP), стандарти написання коду, чек-лісти Code Review, шаблони проектною документації; *Kn_{exp}* (емпіричні знання) – бази даних дефектів, звіти з ретроспектив, документи Lessons Learned, Post-Mortem аналізи, історичні метрики продуктивності; *Kn_{org}* (організаційні знання) – матриці компетенцій (Skill Matrix), онбордінг-матеріали, карти комунікацій.

Запропонована декомпозиція узгоджується із сучасними таксономіями знань у програмній інженерії [10, 12] та підходами до управління знаннями в ІТ-компаніях [6, 7]. Кожен елемент множини *Kn* має різний ступінь впливу на локальні критерії якості (*St, Ma, Pr, Me, Ad, Op*) і розміщується на рівні альтернатив трирівневої ієрархічної моделі (рис. 1). Наприклад, процесні знання (*Kn_{proc}*) найсильніше корелюють із під-

вищенням структурованості (St) та керованості (Ma) [7], тоді як емпіричні знання (Kn_{exp}) є ключовим драйвером адаптивності (Ad) та оптимізованості (Op).

Узгодження локальних критеріїв якості з атрибутами моделі SPICE.

Локальні критерії St , Ma , Pr , Me , Ad , Op , визначені у [15] для процесу розробки ПЗ, в межах цієї роботи застосовуються для оцінювання окремого процесу з базової моделі SPICE. Такий підхід забезпечує сумісність запропонованого апарату зі стандартними рейтинговими шкалами ISO/IEC 33020 [1] та створює передумови для побудови агрегованої оцінки якості процесу розробки ПЗ у цілому через зважування окремих процесів, що є предметом подальших досліджень.

Для обґрунтування такого підходу встановлено відповідність між шістьма локальними критеріями та дев'ятьма атрибутами процесу (Process Attributes, PA) моделі SPICE, визначеними в ISO/IEC 33020 [1]. Кожному локальному критерію поставлено у відповідність той атрибут, через який він реалізується у стандартній моделі зрілості (табл. 1).

Таблиця 1 – Відповідність локальних критеріїв якості атрибутам процесу моделі SPICE

Рівень	Атрибут процесу (PA)	Локальний критерій
1	PA 1.1 Process Performance	– (базове виконання)
2	PA 2.1 Performance Management	Ma
2	PA 2.2 Documented Information Management	Ma
3	PA 3.1 Process Definition	St
3	PA 3.2 Process Deployment	St
3	PA 3.3 Process Assurance	Ad
4	PA 4.1 Quantitative Analysis	Me
4	PA 4.2 Quantitative Control	Pr
5	PA 5.1 Process Innovation	Op

Логіка встановленої відповідності полягає в тому, що кожен локальний критерій характеризує ту властивість процесу, яка в моделі SPICE забезпечується відповідним атрибутом або парою атрибутів: керованість Ma відображає здатність планувати й контролювати виконання процесу та керувати його документованою

інформацією (PA 2.1 та PA 2.2); структурованість St відповідає формалізації стандартного процесу та його систематичному розгортанню в проєктах (PA 3.1 та PA 3.2); адаптивність Ad реалізується через моніторинг і забезпечення відповідності процесу визначеним вимогам у мінливих умовах (PA 3.3); вимірюваність Me реалізується через кількісний аналіз (PA 4.1), а передбачуваність Pr – через кількісне управління процесом (PA 4.2); оптимізованість Op відповідає ідентифікації та реалізації інноваційних змін процесу для досягнення цілей покращення (PA 5.1).

Базовий атрибут PA 1.1 характеризує сам факт виконання процесу і не має окремого критерію якості, оскільки передує їх змістовному оцінюванню.

Побудова ієрархічної моделі на базі методу аналізу ієрархій. Для формалізації впливу декомпонованих корпоративних знань (Kn) на локальні критерії якості з урахуванням організаційного контексту (C) обрано метод аналізу ієрархій [17]. На відміну від інших методів багатокритеріального аналізу, МАІ дозволяє трансформувати якісні судження експертів у кількісні вагові коефіцієнти та має вбудований механізм перевірки логічної узгодженості суджень через відношення узгодженості CR . Доцільність застосування МАІ у задачах оцінювання програмних процесів підтверджена у [8, 14].

Відповідно до методології МАІ, розроблено трирівневу ієрархічну модель впливу (рис. 1), яка має таку структуру: Рівень 1 (Глобальна ціль) – інтегральний показник якості окремого процесу Q . Рівень 2 (Критерії) – St , Ma , Pr , Me , Ad , Op , вагові коефіцієнти яких визначаються з урахуванням організаційного контексту C^* та специфіки конкретного процесу, що оцінюється, і формують унікальний профіль потреб компанії. Рівень 3 (Альтернативи) – класи корпоративних знань Kn_{tech} , Kn_{proc} , Kn_{exp} , Kn_{org} ; на цьому рівні визначається, який клас знань є найбільш дієвим інструментом для досягнення кожного локального критерію з Рівня 2.

Математичний апарат моделі. Основою розрахунку є матриці парних порівнянь A , елементи яких a_{ij} оцінюються експертами за 9-бальною шкалою Сааті [17] і задовольняють умову зворотної симетричності $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ii} = 1$. Локальні вектори пріоритетів w для



Рис. 1. Ієрархічна модель впливу корпоративних знань на локальні критерії якості окремого процесу розробки ПЗ

кожного рівня ієрархії обчислюються як нормований власний вектор матриці A , що відповідає її максимальному власному значенню λ_{\max} :

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w. \quad (1)$$

Для практичного обчислення вектора пріоритетів використовується метод середнього геометричного рядків [17]:

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Нормований вектор пріоритетів визначається як:

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{k=1}^n g_k}. \quad (3)$$

Максимальне власне значення λ_{\max} обчислюється як:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(A \cdot w)_i}{w_i}. \quad (4)$$

Для перевірки логічної несуперечливості експертних оцінок розраховується індекс узгодженості CI та відношення узгодженості CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (6)$$

де n – розмірність матриці порівнянь;

RI – випадковий індекс, значення якого для актуальних розмірностей ($n = 4$ для матриць Рівня 3 та $n = 6$ для матриці Рівня 2) становлять 0,90 та 1,24 відповідно [17]. Експертна оцінка вважається прийнятною, якщо $CR \leq 0,10$ [17].

Глобальний пріоритет j -го класу КЗ обчислюється через зважене підсумовування локальних векторів:

$$W_{\text{global}}(j) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot w_{ij}, j = 1, \dots, k, \quad (7)$$

де m – кількість локальних критеріїв Рівня 2 ($m = 6$);

k – кількість класів КЗ ($k = 4$);

w_i – вага i -го локального критерію з Рівня 2;

w_{ij} – локальний пріоритет j -го класу КЗ відносно i -го локального критерію.

Процедура експертного оцінювання. Формування експертної групи здійснюється за принципами методу Дельфі [18] з незалежним анонімним оцінюванням. До оцінювання залучаються фахівці з практичним досвідом управління процесами розробки ПЗ, які працюють в ІТ-компаніях з відповідним організаційним контекстом; рекомендований розмір групи – 5–15 осіб [14, 17].

Кожен експерт заповнює матриці парних порівнянь для Рівнів 2 і 3 ієрархії за 9-бальною шкалою

Саати, відповідаючи на запитання про відносну важливість локальних критеріїв для заданого контексту C^* (Рівень 2) та відносний вплив класів КЗ на кожен локальний критерій (Рівень 3). Для кожної індивідуальної матриці перевіряється CR за формулами (5)–(6); матриці з $CR > 0,10$ повертаються на перегляд.

В обчислювальному експерименті матриці сформовані на основі узагальненого інженерного досвіду авторів та консультацій з практикуючими фахівцями за описаною процедурою агрегації, що відповідає підходу, апробованому у роботах [13, 14]. Повномасштабне емпіричне дослідження з розширеною групою експертів та перевіркою міжекспертної узгодженості є предметом подальших досліджень.

Обчислювальний експеримент. Для демонстрації працездатності розробленого підходу модель застосовано до процесу ТЕС.2 «Визначення потреб та вимог зацікавлених сторін» [19] у контексті середньої аутсорсингової ІТ-компанії (параметри C^* : середній масштаб команд, динамічні вимоги замовника, жорсткі часові обмеження). Процес ТЕС.2 обрано як ключовий для аутсорсингової моделі, оскільки робота з вимогами замовника є серцевиною цього бізнес-сегменту, а її якість визначальним чином впливає на успіх проєкту. Цей контекст обрано як показовий завдяки поєднанню високої мінливості вимог і критичної ролі корпоративних знань у забезпеченні якості процесів [15, 16].

Визначення ваг локальних критеріїв якості (Рівень 2). Матриця парних порівнянь важливості локальних критеріїв для процесу ТЕС.2 в обраному контексті наведена у табл. 2.

Таблиця 2 – Матриця парних порівнянь важливості локальних критеріїв якості процесу ТЕС.2

Критерій	<i>St</i>	<i>Ma</i>	<i>Pr</i>	<i>Me</i>	<i>Ad</i>	<i>Op</i>	<i>w</i>
<i>St</i>	1	1/3	1/2	1	1/5	2	0,083
<i>Ma</i>	3	1	2	3	1/2	4	0,239
<i>Pr</i>	2	1/2	1	2	1/3	3	0,147
<i>Me</i>	1	1/3	1/2	1	1/4	2	0,087
<i>Ad</i>	5	2	3	4	1	6	0,393
<i>Op</i>	1/2	1/4	1/3	1/2	1/6	1	0,051

Максимальне власне значення $\lambda_{\max} = 6,054$; індекс узгодженості $CI = 0,011$; де відношення узгодженості $CR = 0,009 < 0,10$, що підтверджує надійність оцінок.

Результати розрахунку підтверджують, що для процесу ТЕС.2 «Визначення потреб та вимог зацікавлених сторін» в контексті середньої аутсорсингової компанії найбільш пріоритетним локальним критерієм є адаптивність ($Ad = 0,393$, або 39,3 %), що зумовлено динамікою змін вимог замовників та необхідністю швидкої реакції на їх корекції в процесі роботи з вимогами. Друге місце посідає керованість ($Ma = 0,239$), що відображає необхідність чіткого управління очікуваннями клієнтів.

Визначення впливу класів КЗ на кожен локальний критерій (Рівень 3). Для кожного з шести локальних критеріїв побудовано окрему матрицю парних порівнянь впливу чотирьох класів КЗ. Приклад такої матриці для локального критерію «Структурованість» (*St*) наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Матриця парних порівнянь впливу елементів КЗ на локальний критерій «Структурованість» (St)

Критерій: St	Kn_{tech}	Kn_{proc}	Kn_{exp}	Kn_{org}	w
Kn_{tech}	1	1/5	2	1/2	0,123
Kn_{proc}	5	1	7	3	0,587
Kn_{exp}	1/2	1/7	1	1/3	0,072
Kn_{org}	2	1/3	3	1	0,218

Для даної матриці $\lambda_{max} = 4,019$; $CI = 0,006$; $CR = 0,007 < 0,10$. Аналогічно побудовано матриці для локальних критеріїв Ma , Pr , Me , Ad , Op ; для всіх матриць відношення узгодженості CR не перевищує 0,030, що значно нижче критичного порогу 0,10 і підтверджує надійність отриманих локальних векторів пріоритетів. Обчислені локальні ваги w_{ij} використано далі для синтезу глобального вектора.

Синтез глобального вектора пріоритетів. Глобальний вектор пріоритетів W_{global} обчислюється за формулою (7). Результати синтезу наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Глобальний вектор пріоритетів класів КЗ процесу ТЕС.2

Критерій	Kn_{tech}	Kn_{proc}	Kn_{exp}	Kn_{org}
St (0,083)	0,123	0,587	0,072	0,218
Ma (0,239)	0,160	0,467	0,095	0,277
Pr (0,147)	0,157	0,272	0,483	0,088
Me (0,087)	0,218	0,123	0,587	0,072
Ad (0,393)	0,182	0,068	0,636	0,115
Op (0,051)	0,140	0,140	0,643	0,077
W_{global}	0,169	0,245	0,434	0,153

Результати синтезу демонструють, що для обраного контексту глобальний рейтинг пріоритетності класів корпоративних знань має такий вигляд: лідером є емпіричні знання ($Kn_{exp} = 0,434$, або 43,4 %), друге місце посідають процесні знання ($Kn_{proc} = 0,245$, або 24,5 %), третє – технологічні знання ($Kn_{tech} = 0,169$, або 16,9 %), а замикають рейтинг організаційні знання ($Kn_{org} = 0,153$, або 15,3 %).

Отриманий результат свідчить про те, що для підвищення якості процесу ТЕС.2 в умовах аутсорсингової компанії пріоритетним є розвиток саме емпіричних знань – баз даних дефектів, документів Lessons Learned, історичних метрик та звітів з ретроспектив, оскільки вони найсильніше впливають на ключовий локальний критерій адаптивності.

Аналіз чутливості результатів. Для оцінки стійкості отриманих пріоритетів класів КЗ для процесу ТЕС.2 «Визначення потреб та вимог зацікавлених сторін» до можливих варіацій в оцінках проведено аналіз чутливості, який у МАІ полягає у дослідженні впливу зміни входних параметрів на ранжування альтернатив [20]. Розглянемо вплив зміни ваги найбільш пріоритетного локального критерію «Адаптивність» (Ad) на глобальний рейтинг класів КЗ за трьома сценаріями (табл. 5). Сценарій S1 відповідає базовому контексту середньої аутсорсингової ІТ-компанії ($Ad = 0,393$), S2 – тому самому контексту зі зниженою динамікою вимог замовника ($Ad = 0,200$), а S3 – контексту великої продуктової компанії ($St = 0,350$; $Me = 0,250$).

Таблиця 5 – Аналіз чутливості: глобальні пріоритети W_{global} для процесу ТЕС.2 за різних сценаріїв контексту

Сценарій	Kn_{tech}	Kn_{proc}	Kn_{exp}	Kn_{org}	Лідер
S1	0,169	0,245	0,434	0,153	Kn_{exp}
S2	0,172	0,298	0,352	0,178	Kn_{exp}
S3	0,178	0,368	0,276	0,178	Kn_{proc}

При зниженні ваги Ad з 0,393 до 0,200 (сценарій S2) Kn_{exp} зберігає першу позицію (0,352), однак розрив з Kn_{proc} суттєво скорочується (0,298).

При переході до сценарію S3 Kn_{proc} виходить на першу позицію (0,368), що є логічним: якщо процес ТЕС.2 розглядається в контексті великої продуктової компанії, формалізовані процесні регламенти роботи з вимогами є суттєвішими, ніж емпіричний досвід.

Таким чином, аналіз чутливості підтверджує, що модель коректно реагує на зміни організаційного контексту, в якому виконується процес.

Обговорення результатів. Домінування емпіричних знань Kn_{exp} (43,4 %) для процесу ТЕС.2 в аутсорсинговому контексті пояснюється специфікою організаційної моделі: в умовах мінливості вимог замовника формалізовані уроки минулого (Lessons Learned) та аналіз історичних дефектів виявляються дієвішим за статичні інструкції, що узгоджується з [5, 6]. Водночас структура впливу неоднорідна: Kn_{proc} домінує для структурованості (58,7 %) та керованості (46,7 %), що підтверджує взаємозалежність практик управління знаннями та якістю [7] і необхідність контекстно-залежного балансу між класами КЗ. Аналіз чутливості (табл. 5) показав, що при зміні контексту профіль пріоритетів кардинально перебудовується.

Висновки. У роботі вирішено науково-практичне завдання формалізації впливу корпоративних знань на локальні критерії якості процесу розробки ПЗ з урахуванням організаційного контексту ІТ-компанії.

Здійснено структурну декомпозицію корпоративних знань на чотири класи (Kn_{tech} , Kn_{proc} , Kn_{exp} , Kn_{org}) із визначенням критеріїв належності: формалізованості, відчуженості від носія, повторної використовуваності.

Встановлено відповідність шести локальних критеріїв якості (St , Ma , Pr , Me , Ad , Op) дев'ятьом атрибутам процесу моделі SPICE відповідно до ISO/IEC 33020:2019, що забезпечує сумісність запропонованого підходу зі стандартними рейтинговими шкалами.

Розроблено трирівневу ієрархічну модель на базі МАІ з математичним апаратом (формули (1)–(7)), яка параметризується через організаційний контекст компанії $C = \{S, T, M, R\}$. Наукова новизна полягає у встановленні кількісної залежності між класами корпоративних знань та локальними критеріями якості окремого процесу через призму організаційного контексту з прив'язкою до атрибутів моделі SPICE.

В обчислювальному експерименті для процесу ТЕС.2 «Визначення потреб та вимог зацікавлених сторін» у контексті середньої аутсорсингової ІТ-компанії побудовано 7 матриць парних порівнянь ($CR \leq 0,030$) та встановлено глобальний рейтинг класів корпоративних знань: емпіричні знання ($Kn_{exp} = 0,434$), процесні ($Kn_{proc} = 0,245$), технологічні ($Kn_{tech} = 0,169$), організа-

ційні ($Kn_{org} = 0,153$). Аналіз чутливості при зміні контексту підтвердив коректну реакцію ранжування. Практичне значення – заміна інтуїтивних рішень IT-менеджменту на науково обґрунтований механізм розподілу ресурсів на розвиток КЗ для цільового підвищення якості окремого процесу розробки ПЗ.

Подальші дослідження передбачають розширення моделі на множину процесів життєвого циклу ПЗ, агрегацію оцінок окремих процесів в інтегральну якість процесу розробки програмного забезпечення, проведення повномасштабного експертного опитування та урахування ресурсних обмежень, що становить розвиток підходу, започаткованого у [14].

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори використовували Claude для перевірки граматики та орфографії, перепарафразування та переформулювання тексту. Після використання цих інструментів/сервісів автори перевірили та відредагували вміст за необхідності та несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел інформації

1. ISO/IEC 33020:2019. *Information technology – Process assessment – Process measurement framework for assessment of process capability*. Geneva: ISO, 2019.
2. ISACA. *CMMI Model, Version 3.0*. ISACA, 2023.
3. ISO/IEC/IEEE 12207:2017. *Systems and software engineering – Software life cycle processes*. Geneva: ISO, 2017.
4. Iqbal J., Jibrán H., Al-Shamayleh A. S., Abbas F., Akhuzada A., Alharthi S. Z., Gani A. Comparative study of SPI success factors in global and in-house environment for large-scale software companies. *PeerJ Computer Science*. 2023. Vol. 9. Article e1656. DOI: 10.7717/peerj-cs.1656.
5. Kuhrmann M., Tell P., Hebig R., Klünder J., Münch J., Linssen O., Pfahl D., Felderer M., Prause C., Macdonell S., Nakatumba-Nabende J., Raffo D., Beecham S., Tüzün E., López G., Paez N., Fontdevila D., Licorish S., Küpper S., Richardson I. What Makes Agile Software Development Agile? *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2021. Vol. 48, no. 9. P. 3523–3539. DOI: 10.1109/TSE.2021.3099532.
6. Chugh M. A Deep Drive into Knowledge Management for Improving Software Process and Product: Visions and Research Directions / M. Chugh. *Proceedings of 3rd International Conference on Machine Learning, Advances in Computing, Renewable Energy and Communication*. LNEE, vol. 915. Springer, 2022. P. 21–30. DOI: 10.1007/978-981-19-2828-4_2.
7. Naprawski T. Best Practices for Knowledge and Quality Management in IT Projects. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 225. P. 3813–3821. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.377.
8. Packer Mohamed S. F., Baharom F., Deraman A., Tarawneh O., Yusof Y. Software Process Assessment and Certification: Application of the Analytic Hierarchy Process for Priority Determination. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2022. Vol. 14, no. 3. DOI: 10.13033/ijahp.v14i3.870.
9. Silvestre L., Bastarrica M., Hurtado J., Sánchez J. Formalizing the Goal-directed and Context-based Software Process Tailoring Method. *2021 XLVII Latin American Computing Conference (CLEI)*. IEEE, 2021. P. 1–9. DOI: 10.1109/CLEI53233.2021.9639963.
10. Fagerholm F., Felderer M., Fucci D., Unterkalmsteiner M., Marculescu B., Martini M., Wallgren L., Feldt R., Lehtelä B., Nagyvárad B., Khattak J. Cognition in Software Engineering: A Taxonomy and Survey of a Half-Century of Research. *ACM Computing Surveys*. 2022. Vol. 54, no. 11s. Article 226. DOI: 10.1145/3508359.
11. Kucharska W., Erickson S. Tacit knowledge acquisition & sharing, and its influence on innovations: A Polish/US cross-country study. *International Journal of Information Management*. 2023. Vol. 71. 102647. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2023.102647.
12. Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge-Creating Company: How*

Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, 1995. 284 p.

13. Годлевський М. Д., Гончаренко Т. Є., Бурлаков Г. О., Малець Д. К. Шляхи підвищення якості процесу розробки програмного забезпечення на основі моделей зрілості. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2019. № 2. С. 63–69. DOI: 10.20998/2079-0023.2019.02.11.
14. Рубін Е. Е., Годлевський М. Д., Бараш В. С. Структурний синтез моделі зрілості SPICE Integration. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2015. № 58 (1167). С. 77–81.
15. Сокол В. Є., Годлевський М. Д., Гурт Д. О., Пашнєв А. А. Аналіз проблем підвищення якості процесу розробки програмного забезпечення IT-компаній з урахуванням її корпоративних знань. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 10 (51). DOI: 10.52058/2786-6025-2025/10(51)-2004-2024.
16. Гурт Д. О. Класифікація IT-компаній як інструмент аналізу проблем підвищення якості процесу розробки програмного забезпечення / Д. О. Гурт, В. Є. Сокол. *Тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025*. Харків: НТУ «ХПІ», 2025.
17. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, 1980. 287 p.
18. Dalkey N. C., Helmer O. An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts. *Management Science*. 1963. Vol. 9, No. 3. P. 458–467. DOI: 10.1287/mnsc.9.3.458.
19. ISO/IEC TS 33061:2021. *Information technology – Process assessment – Process assessment model for software life cycle processes*. Geneva: ISO, 2021. 73 p.
20. Triantaphyllou E., Sánchez A. A Sensitivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Decision Sciences*. 1997. Vol. 28, no. 1. P. 151–194. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x.

References (transliterated)

1. ISO/IEC 33020:2019. *Information technology – Process assessment – Process measurement framework for assessment of process capability*. Geneva: ISO, 2019.
2. ISACA. *CMMI Model, Version 3.0*. ISACA, 2023.
3. ISO/IEC/IEEE 12207:2017. *Systems and software engineering – Software life cycle processes*. Geneva: ISO, 2017.
4. Iqbal J., Jibrán H., Al-Shamayleh A., Abbas F., Akhuzada A., Alharthi S., Gani A. Comparative study of SPI success factors in global and in-house environment for large-scale software companies. *PeerJ Computer Science*. 2023, vol. 9, article e1656. DOI: 10.7717/peerj-cs.1656.
5. Kuhrmann M., Tell P., Hebig R., Klünder J., Münch J., Linssen O., Pfahl D., Felderer M., Prause C., Macdonell S., Nakatumba-Nabende J., Raffo D., Beecham S., Tüzün E., López G., Paez N., Fontdevila D., Licorish S., Küpper S., Richardson I. What Makes Agile Software Development Agile? *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2021, vol. 48, no. 9, pp. 3523–3539. DOI: 10.1109/TSE.2021.3099532.
6. Chugh M. A Deep Drive into Knowledge Management for Improving Software Process and Product: Visions and Research Directions. *Proceedings of 3rd Int. Conf. on Machine Learning, Advances in Computing, Renewable Energy and Communication*. LNEE, vol. 915. Springer, 2022, pp. 21–30. DOI: 10.1007/978-981-19-2828-4_2.
7. Naprawski T. Best Practices for Knowledge and Quality Management in IT Projects. *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 225, pp. 3813–3821. DOI: 10.1016/j.procs.2023.10.377.
8. Packer Mohamed S. F., Baharom F., Deraman A., Tarawneh O., Yusof Y. Software Process Assessment and Certification: Application of the Analytic Hierarchy Process for Priority Determination. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*. 2022, vol. 14, no. 3. DOI: 10.13033/ijahp.v14i3.870.
9. Silvestre L., Bastarrica M., Hurtado J., Sánchez J. Formalizing the Goal-directed and Context-based Software Process Tailoring Method. *2021 XLVII Latin American Computing Conf. (CLEI)*. IEEE, 2021, pp. 1–9. DOI: 10.1109/CLEI53233.2021.9639963.
10. Fagerholm F., Felderer M., Fucci D., Unterkalmsteiner M., Marculescu B., Martini M., Wallgren L., Feldt R., Lehtelä B., Nagyvárad B., Khattak J. Cognition in Software Engineering: A Taxonomy and Survey of a Half-Century of Research. *ACM*

- Computing Surveys*. 2022, vol. 54, no. 11s, article 226. DOI: 10.1145/3508359.
11. Kucharska W., Erickson S. Tacit knowledge acquisition & sharing, and its influence on innovations: A Polish/US cross-country study. *International Journal of Information Management*. 2023, vol. 71, article 102647. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2023.102647.
 12. Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1995. 284 p.
 13. Godlevskiy M. D., Goncharenko T. Ye., Burlakov H. O., Malets D. K. Shliakhy pidvyshchennia yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennia na osnovi modelei zrilosti [Ways to improve the quality of the software development process based on maturity models]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI»*. Ser.: *Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 2, pp. 63–69. DOI: 10.20998/2079-0023.2019.02.11. (in Ukr.).
 14. Rubin E. E., Godlevskiy M. D., Barash V. S. Strukturny sintez modeli zrelosti SPICE Integration [Structural synthesis of the SPICE Integration maturity model]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KhPI»*. Ser.: *Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 58 (1167), pp. 77–81. (in Russ.).
 15. Sokol V. Ye., Godlevskiy M. D., Hurt D. O., Pashniev A. A. Analiz problem pidvyshchennia yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennia IT-kompanii z urakhuvanniam yii korporatyvnykh znan [Analysis of problems of improving the quality of the software development process of an IT company taking into account its corporate knowledge]. *Nauka i tekhnika sьогодni* [Science and Technology Today]. 2025, no. 10 (51). DOI: 10.52058/2786-6025-2025-10(51)-2004-2024. (in Ukr.).
 16. Hurt D. O., Sokol V. Ye. Klyasifikatsiia IT-kompanii yak instrument analizu problem pidvyshchennia yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennia [Classification of IT companies as a tool for analyzing problems of improving the quality of the software development process]. *Tezy dopovidei XXXIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2025* [Abstracts of the XXXIII Int. Scientific and Practical Conf. MicroCAD-2025]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2025. (in Ukr.).
 17. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, 1980. 287 p.
 18. Dalkey N. C., Helmer O. An Experimental Application of the Delphi Method to the Use of Experts. *Management Science*. 1963, vol. 9, no. 3, pp. 458–467. DOI: 10.1287/mnsc.9.3.458.
 19. ISO/IEC TS 33061:2021. Information technology – Process assessment – Process assessment model for software life cycle processes. Geneva: ISO, 2021. 73 p.
 20. Triantaphyllou E., Sánchez A. A Sensitivity Analysis Approach for Some Deterministic Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Decision Sciences*. 1997, vol. 28, no. 1, pp. 151–194. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1997.tb01306.x.

Надійшла (received) 03.03.2026
 Прийнята (accepted) 19.03.2026
 Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.41

V. Ye. SOKOL, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Researcher at the Learning Technologies Research Group, RWTH Aachen University, Templergraben 55, 52062 Aachen, Germany; e-mail: sokol@informatik.rwth-aachen.de; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>

D. O. HURT, Postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: denys.hurt@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3880-9081>

M. D. GODLEVSKYI, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Computer Science and Information Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: Mykhailo.Hodlevskiy@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

A. A. PASHNIEV, Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher, Docent at the Department of Information Systems and Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: pashniev@email.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9150-6108>

MODELING THE INFLUENCE OF CORPORATE KNOWLEDGE AND ORGANIZATIONAL CONTEXT OF AN IT COMPANY ON LOCAL QUALITY CRITERIA OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS

The organizational context of an IT company has been parameterized by scale, business model, process maturity level, and resource constraints, and its corporate knowledge has been structurally decomposed into four classes: technological, process, empirical, and organizational, with defined inclusion criteria (formalizability, separation from the individual carrier, reusability). The local quality criteria – structuredness, manageability, predictability, measurability, adaptability, and optimizability – have been defined as evaluation criteria for an individual software development process, aligned with the nine process attributes of the SPICE model. A formalized three-level hierarchical model has been developed using the Analytic Hierarchy Process that establishes quantitative relationships among the quality of an individual software development process, its local criteria, and classes of corporate knowledge with regard to the organizational context of a specific IT company. A computational experiment has been conducted for the TEC.2 process «Stakeholder needs and requirements definition» in the context of a medium-sized outsourcing company, which revealed the dominance of empirical knowledge (43.4% of the global weight) and substantiated its prioritization. Sensitivity analysis confirmed the correct response of the ranking under contextual changes. The scientific novelty consists in establishing a quantitative dependence between classes of corporate knowledge and the quality of an individual software development process through local quality criteria with a linkage to the SPICE model attributes. The practical significance of the approach lies in replacing intuitive IT management decisions with a scientifically grounded mechanism for resource allocation toward the development of specific classes of corporate knowledge for the targeted improvement of the quality of specific software development processes. Further research will address resource limitations and the aggregation of individual process scores into the integral quality of the software development process.

Keywords: software development process, local quality criteria, corporate knowledge, organizational context, SPICE model, analytic hierarchy process, formalization of impact.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Сокол Володимир Євгенович / Sokol Volodymyr Yevhenovych

Автор 2 / Author 2: Гурт Денис Олександрович / Hurt Denys Oleksandrovych

Автор 3 / Author 3: Годлевський Михайло Дмитрович / Godlevskiy Mykhailo Dmytrovych

Автор 4 / Author 4: Пашнев Андрій Анатолійович / Pashniev Andrii Anatoliiovych

К. Е. ПЕТРОВ, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; e mail: kostiantyn.petrov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-711X>

Т. В. ЧАЛИЙ, аспірант кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, taras.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3796-5810>

КОНТРАФАКТИЧНА МОДЕЛЬ МЕДИЧНОГО БІЗНЕС-ПРОЦЕСУ

Предметом дослідження є медичні бізнес-процеси. Мета роботи полягає у розробці контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу з тим, щоб забезпечити можливість вибору альтернативних рішень при наданні первинної медичної допомоги, подальшого амбулаторного лікування, а також клінічного шляху та реабілітації. Досягнення мети орієнтовано на забезпечення гнучкості медичних бізнес-процесів в умовах ресурсних, фінансових і регуляторних обмежень. Для досягнення мети вирішуються наступні задачі: розробити формальну структуру контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу як розширення ситуаційної моделі узагальненого медичного бізнес-процесу, з включенням каузальних залежностей та системи темпоральних правил, що описують допустимі послідовності подій і часові інтервали між ними; виконати експериментальну перевірку системи клінічних обмежень, що задає простір можливих контрафактичних сценаріїв. Запропоновано контрафактичну модель медичного бізнес-процесу, яка на відміну від існуючих поєднує ситуаційну структуру медичного бізнес-процесу, каузальний граф причин для виконання дій процесу, систему обмежень, що визначають можливість реалізації траєкторій процесу згідно клінічних протоколів, а також темпоральні правила, що визначають послідовність подій медичного бізнес-процесу у часі. Експериментальна перевірка моделі з урахуванням системи обмежень, каузального графу та темпоральних правил підтвердила зменшення частки клінічно неприйнятних сценаріїв у порівнянні з традиційним підходом до побудови контрафактичних пояснень. Подальший розвиток запропонованої контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу пов'язаний із розробкою інформаційної технології підтримки прийняття рішень у медичних бізнес-процесах для побудови індивідуалізованих маршрутів лікування з урахуванням потреб пацієнта та обмежень системи охорони здоров'я.

Ключові слова: медичний бізнес-процес; контрафактична модель; ситуаційна модель; структурна причинна модель; темпоральні правила; клінічні обмеження; темпоральні обмеження; індивідуалізоване лікування.

Вступ. Бізнес-процес (БП) включає послідовність процедур зі створення продукту або послуги, що становить цінність для користувача [1]. Цикл управління бізнес-процесами включає етапи аналізу діяльності організації у процесному аспекті, побудову та подальшу реалізацію моделей бізнес-процесів, моніторинг БП й удосконалення моделей БП за результатами моніторингу. У процес удосконалення процесу враховуються ресурсні, фінансові і темпоральні обмеження на зв'язки між процедурами процесу [2].

Медичні бізнес-процеси (МБП) є класом БП, що інтегрують послідовність дій з надання медичної допомоги, починаючи з первинного звернення пацієнта й до виписки й подальшого за ним спостереження. МБП включають діагностичні, лікувальні, а також реабілітаційні та адміністративні процедури.[3] Ключова особливість медичних процесів полягає в необхідності та важливості враховувати індивідуальні особливості пацієнта та динаміку клінічної ситуації, що потребує розробки процесних моделей, які дають можливість адаптувати послідовність і параметри процедур за умови збереження узгодженості з клінічними протоколами та наявними ресурсними обмеженнями медичного закладу [4] Це істотно ускладнює моделювання.

МБП може бути представлений на основі ситуаційної моделі. Остання містить послідовність ситуацій, у кожній із яких здійснюється вибір альтернатив виконання процедур з комплексу обмежень[5]. За результатами вибору приймається рішення щодо виконання подальших дій МБП з урахуванням доступних ресурсів, часу лікування та клінічних обмежень. Дії МБП реалізують послідовність фаз первинної медичної допомоги, подальшого амбулаторного лікування, а та-

кож клінічного шляху та реабілітації. Комбінації цих фаз утворюють альтернативні траєкторії виконання МБП [6]

Разом із тим процесний аналіз у сучасних медичних інформаційних системах здебільшого зосереджується на виявленні відхилень від стандартизованих моделей (conformance checking) та не забезпечує автоматизованого формування клінічно здійснених альтернативних траєкторій [7–9]. Контрафактичний аналіз, який розглядає альтернативні сценарії типу «що було б, якби певне рішення було змінено», активно застосовується для пояснення рішень моделей машинного навчання, але не враховує обмежень медичної сфери, пов'язані із ризиком для здоров'я людини [10, 11].

Таким чином, розробка контрафактичних моделей медичних бізнес-процесів дає можливість забезпечити індивідуалізацію медичної допомоги з урахуванням наявних ресурсних і фінансових обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні підходи до моделювання бізнес-процесів орієнтовані на формування набору можливих послідовностей дій, що забезпечують досягнення цільового стану системи процесного управління. Послідовності дій описуються як послідовності активностей у складі підпроцесів з використанням стандартизованих нотаций, таких як BPMN [5, 7, 8].

У дослідженні з управління бізнес-процесами структурується повний життєвий БП, починаючи з визначення цілей, планування, побудов процесної моделі, й до виконання і моніторингу та подальшого удосконалення з використанням інтелектуального аналізу процесів на основі даних із журналів подій процесу [1, 7].

© Петров К. Е., Чалий Т. В., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



У сфері медичних бізнес-процесів процесний підхід використовується для підвищення якості медичних послуг, зменшення кількості помилок, скорочення часу очікування, оптимізації використання ресурсів та покращення координації між різними рівнями медичної допомоги [2, 3, 5]. Застосування інтелектуального аналізу процесів у МБП дає можливість виявляти вузькі місця, раціоналізувати маршрути пацієнтів та стандартизувати процес їх лікування та подальшої реабілітації. Проте вирішення цих задач потребує розробки гнучких процесних моделей, призначених для індивідуалізації лікування [2, 4, 9].

В групі медичних бізнес-процесів окремо розглядаються клінічні шляхи (clinical pathways), шляхи догляду за пацієнтами (care pathways) та шляхи лікування захворювання (disease management), що відображають різні аспекти надання медичної допомоги [4–6]. Традиційний підхід до виділення клінічних шляхів сприяє зниженню варіативності лікування і забезпечує передбачуваність його результатів, однак обмежує врахування індивідуальних потреб пацієнта та обмежень закладів охорони здоров'я [4, 5].

Контрфактичний аналіз зазвичай застосовується для пояснення рішень, отриманих в інтелектуальних системах, зокрема при вирішенні задач класифікації та прогнозування, де пропонуються методи генерації контрфактичних прикладів як альтернативних вхідних наборів даних, що змінюють результат моделі [10–12]. Дослідження щодо контрфактичних пояснень, підтверджують підвищення довіри лікарів до систем штучного інтелекту. Проте на практиці стандартні алгоритми часто не враховують незмінювані властивості пацієнта, а також клінічні протоколи, що може привести до формування неприйнятних сценаріїв виконання МБП [13, 14].

Представлена в [5] ситуаційна модель узагальненого медичного бізнес-процесу забезпечує вибір альтернативних сценаріїв. Проте у моделі не виділено контрфактичні сценарії та не визначено множини клінічних обмежень, які визначають можливості практичного застосування моделі.

Даний аналіз свідчить про практичну потребу у забезпеченні індивідуалізації лікування з урахування ресурсних обмежень на основі побудови медичних бізнес-процесів, проте існуючі методи до побудови БП орієнтовані на традиційні бізнес-процеси і не враховують важливість індивідуалізації медичного обслуговування на основі аналізу можливих альтернатив, представлених контрфактами, що і свідчить про актуальність дослідження.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу як подальший розвиток ситуаційного підходу до моделювання узагальненого медичного бізнес-процесу з тим, щоб забезпечити можливість вибору альтернативних рішень при лікуванні в клініці, при догляді та в рамках повного процесу лікування захворювання. Досягнення мети орієнтовано на забезпечення гнучкості медичних бізнес-процесів в умовах ресурсних, фінансових і регуляторних обмежень.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі:

– розробити формальну структуру контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу як розширення ситуаційної моделі узагальненого медичного бізнес-процесу, з включення каузальних залежностей та системи темпоральних правил, що описують допустимі послідовності подій і часові інтервали між ними;

– визначити та виконати експериментальну перевірку системи клінічних обмежень, що задає простір можливих контрфактичних сценаріїв.

Контрфактична модель медичного бізнес-процесу.

Ситуаційна модель узагальненого медичного бізнес-процесу задається з трійкою $\langle S, D_{in}, D_{out} \rangle$ із послідовності ситуацій S , а також множин вхідних D_{in} і вихідних D_{out} даних та може бути інтерпретована як «карта» етапів процесу, що містить дані про пацієнта до та після лікування.

Контрфактична модель CM розширює ситуаційне представлення, додаючи до нього множини альтернативних сценаріїв і систему обмежень, що можна розглядати як доповнення моделі множиною альтернативних варіантів виконання та набору обмежень, які відфільтровують неприйнятні варіанти. Контрфактична модель формально задається як кортеж:

$$CM = \langle S, D_{in}, D_{out}, CF, \Pi \rangle, \quad (1)$$

де CF – множина контрфактичних сценаріїв виконання МБП;

Π – система обмежень, що визначає можливість клінічної реалізації відповідних сценаріїв.

Кожний контрфактичний сценарій $cf \in CF$ інтерпретується як альтернативна траєкторія процесу із зміненними рішеннями у вибраних ситуаціях, але із збереженням послідовності ситуацій S . Відображення

$$\varphi: CF \rightarrow S^* \quad (2)$$

ставить у відповідність кожному сценарію послідовність ситуацій, які він виконує, що дозволяє інтерпретувати сценарії в термінах ситуаційного опису медичного бізнес-процесу. Якщо множини сценаріїв та обмежень не враховуються, то контрфактична модель спрощується до початкової ситуаційної моделі.

Важливим елементом контрфактичної моделі є структурна каузальна модель медичного бізнес-процесу. Дана модель визначає взаємний вплив один на одного факторів та подій у медичному бізнес-процесі. Модель представляється як орієнтований граф, де вершинами є клінічні фактори та рішення, а дугами є причинні залежності.

Формально така модель задається орієнтованим ациклічним графом $G = (V, E)$, де V – множина змінних (кроки лікування, стани пацієнта, результати), E – множина дуг, що задають причинно-наслідкові зв'язки між ними.

Для кожної змінної $X_i \in V$ задається функція f_i , яка визначає, як значення цієї змінної формується на

основі значень її батьківських (з урахуванням орієнтованості графа G) змінних та випадкових факторів ε_i :

$$X_i = f_i(\text{Pa}(X_i), \varepsilon_i), \quad (3)$$

де $\text{Pa}(X_i)$ – множина батьківських змінних для X_i ;

ε_i – стохастичне збурення, яке моделює невраховані фактори.

Це означає, що у МБП кожна подія та її результати мають «попередників», від яких вона залежить. На подію також може впливати випадкова складова.

Слід виділити приховані спільні причини, характерні саме для МБП. Такі причини одночасно впливають на вибір траєкторії лікування та кінцевий результат лікування.

Такими причинами, наприклад, може бути базовий стан здоров'я або супутні захворювання пацієнта.

Опис втручання дає можливість змінити певне рішення в моделі і оцінити відповідні зміни результату. Втручання позначається оператором *do*:

$$P(Y | do(X = x')), \quad (4)$$

де X – змінна, на яку здійснюється втручання (наприклад, вибір типу лікування);

x' – нав'язане значення;

Y – результат після втручання.

Для медичного бізнес-процесу це формалізоване втручання дає можливість оцінити відповіді на запитання типу: «яким був би результат лікування, якби замість варіанту $X = x$ було вибрано $X = x'$?». Множина допустимих втручань обмежується системою обмежень Π , зокрема обмеженнями на клінічні протоколи, що виключає сценарії, які суперечать медичним знанням

Система Π задає формальні правила, що визначають, які контрфактичні сценарії є неприйнятними з медичної точки зору. Множина Π включає обмеження щодо заборони змін стабільних характеристик пацієнта (вік, стать, базові анатомо-фізіологічні параметри), а також темпоральні обмеження. Останні формалізують допустимі часові відношення між клінічними подіями у вигляді темпоральних правил: наприклад, «після події 1 протягом не більше ніж t часу має відбутися подія 2 або 3» чи «подія 2 не може відбутися раніше за 1» [15, 16].

Темпоральний аспект контрфактичних сценаріїв у моделі задається системою формальних темпоральних правил над послідовностями подій медичного бізнес-процесу. Для кожної події визначається часовий інтервал Δ , в межах якого перевіряється виконання відповідних темпоральних правил. Темпоральне правило формулюється у вигляді імплікації: якщо на інтервалі події Δ зустрічається певний тригер (подія 1), то в цьому самому вікні протягом заданого часу повинна з'явитися хоча б одна з подій-наслідків (2 або 3). Сукупність темпоральних обмежень становить систему правил, які можуть бути представлені у вигляді формул лінійної темпоральної логіки.

Експериментальна перевірка розробленої моделі.

Експериментальна перевірка орієнтована на оцінювання ефективності системи обмежень для скорочення частки контрфактичних сценаріїв, що не можуть бути реалізовані згідно клінічних протоколів, порівняно з базовим методом контрфактичного пояснення DiCE [13]. В якості вхідних даних використано фрагмент логу медичного бізнес-процесу, що містить реалізовані траєкторії виконання МБП. Ці траєкторії охоплюють інформацію про характеристики пацієнта, послідовність виконаних процедур, їх тривалість.

На першому етапі перевірки створювались контрфактичні сценарії шляхом застосування допустимих втручань, які змінювали вибір процедур, їх порядок та тривалість, але не враховували обмеження Π .

Для кожного сценарію розраховувались агреговані показники вартості, тривалості та використання ресурсів. Аналогічно, за допомогою методу DiCE формувались контрфактичні варіанти без прив'язки до ситуацій.

На другому етапі до сценаріїв контрфактичної моделі та до DiCE-сценаріїв застосовувалась система обмежень Π . Спочатку відфільтровувались сценарії, що порушували обмеження щодо зміни незмінюваних характеристик пацієнта. В подальшому перевірялися темпоральні обмеження у формі темпоральних правил, що визначали відповідність часовим вимогам щодо порядку і допустимих лагів між діагностикою, лікуванням і контрольними оглядами.

Також застосовувались обмеження щодо відповідності бізнес-процесу вимогам клінічних протоколів. Результати експериментальної перевірки наведено в табл. 1.

Як видно з таблиці, при використанні базового методу DiCE понад половина згенерованих контрфактичних сценаріїв порушує принаймні одне з клінічних обмежень. Для розробленої моделі частка клінічно неприйнятних сценаріїв зменшується до 9 %.

Таблиця 1 – Порівняння виконання обмежень для контрфактичних сценаріїв медичного бізнес-процесу

Підхід	Кількість згенерованих сценаріїв	Кількість клінічно неприйнятних сценаріїв	Частка клінічно неприйнятних сценаріїв, %
DiCE	80	52	65
Контрфактична модель	80	7	9

Перевага розробленої контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу полягає в тому, що контрфактичні сценарії формуються на рівні ситуаційної структури медичного бізнес-процесу, а не лише на рівні векторів ознак, як при традиційних підходах, що забезпечує виконання обмежень предметної області.

Отримані результати експерименту демонструють, що інтеграція системи обмежень у контрфактичну

модель дозволяє суттєво зменшити частку сценаріїв, що не можуть бути реалізовані порівняно з базовими методами контрфактичного пояснення. Тобто розроблена модель забезпечує урахування доменних обмежень у медичній сфері при побудові контрфактичних сценаріїв, що відображають альтернативні варіанти виконання медичних бізнес-процесів.

Використання комбінації каузальних та темпоральних залежностей дозволяє перевіряти коректність причинно-наслідкових залежностей, оскільки причина завжди в часі має передувати наслідку.

Можливості розробленої моделі суттєво залежать від повноти формалізації клінічних протоколів і темпоральних обмежень, а також доступності логів з темпоральними мітками. У предметних областях, де протоколи є неповними або неоднозначними, система обмежень потребує додаткового налаштування, а контрфактичні сценарії мають бути валідовані експертами.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення застосування на інші види медичних бізнес-процесів, зокрема на мультидисциплінарні маршрути лікування пацієнтів, а також розробка інтегрованих метрик оцінки якості контрфактичних сценаріїв.

Висновки. Запропоновано контрфактичну модель медичного бізнес-процесу, яка поєднує ситуаційну структуру медичного бізнес-процесу, каузальний граф причин для виконання дій процесу, систему обмежень, що визначають можливість реалізації траєкторій процесу згідно клінічних протоколів, а також темпоральні правила, що визначають послідовність подій медичного бізнес-процесу у часі.

Експериментальна перевірка моделі з урахуванням системи обмежень, каузального графу та темпоральних правил виконана на прикладі даних з медичного бізнес-процесу, де показано істотне зменшення частки клінічно неприйнятних сценаріїв у порівнянні з базовим методом побудови контрфактичних сценаріїв.

Подальший розвиток запропонованої контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу пов'язаний із розробкою інформаційних технологій підтримки прийняття рішень у медичних бізнес-процесах для побудови індивідуалізованих маршрутів лікування з урахуванням потреб пацієнта та обмежень системи охорони здоров'я.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при написанні тексту цієї роботи.

Список використаних джерел інформації

1. Van der Aalst W. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. P. 1–37. DOI: 10.1155/2013/507984.
2. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D., Sabuco García Y. Business Process Management for optimizing clinical processes: A systematic literature review. *Health Informatics Journal*. 2020. Vol. 26, no. 2. P. 1305–1320. DOI: 10.1177/1460458219877092.
3. Patharkar A. C., Cai F. B., Zardiniy A., Al-Hindawi F., Wu T. Predictive modeling of biomedical temporal data in healthcare applications: review and future directions. *Frontiers in Physiology*. 2024. Vol. 15. DOI: 10.3389/fphys.2024.1386760.

4. De Büscher A., Kugler J. The effectiveness of clinical pathways in inpatient settings – an umbrella review. *Journal of Public Health*. 2024. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10389-024-02227-w.
5. Петров К. Е., Чалий Т. В. Ситуаційна модель медичного бізнес-процесу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(12), С. 42–45. DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.17.
6. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D. Clinical pathways: A systematic review of definitions, components, and applications. *Health Policy*. 2019. Vol. 123, no. 12. P. 1223–1232.
7. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin: Springer, 2018. 527 p.
8. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012. Vol. 34. P. 124–134.
9. Van der Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2016. 467 p.
10. Petrocelli J. V. Pitfalls of Counterfactual Thinking in Medical Practice: Preventing Errors by Using More Functional Reference Points. *Journal of Public Health Research*. 2013. Vol. 2:e24. P. 136–143.
11. Wachter S., Mittelstadt B., Russell C. Counterfactual Explanations without Opening the Black Box: Automated Decisions and the GDPR. *Harvard Journal of Law & Technology*. 2018. Vol. 31, no. 2. P. 841–887.
12. Pearl J., Mackenzie D. *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*. New York: Basic Books, 2018. 432 p.
13. Muthilal R. K., Sharma A., Tan C. Explaining Machine Learning Classifiers through Diverse Counterfactual Explanations. *Proceedings of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT 2020)*. 2020. P. 607–617. DOI: 10.1145/3351095.3372850.
14. Van Looveren A., Klaise J., Vacanti G., Coca A. Interpretable Counterfactual Explanations Guided by Prototypes. *Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML PKDD 2021)*. 2021. P. 650–665.
15. Chala O. V. Pobudova temporalnykh pravyl dlia predstavleniia znan v informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09. (In Ukr.)
16. Chala O. V. Model uzahalnenoho predstavleniia temporalnykh znan v intelektualnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. (In Ukr.)

References (transliterated)

1. Van der Aalst W. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013, pp. 1–37. DOI: 10.1155/2013/507984.
2. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D., Sabuco García Y. Business Process Management for optimizing clinical processes: A systematic literature review. *Health Informatics Journal*. 2020, vol. 26, no. 1, pp. 1305–1320. DOI: 10.1177/1460458219877092.
3. Patharkar A. C., Cai F. B., Zardiniy A., Al-Hindawi F., Wu T. Predictive modeling of biomedical temporal data in healthcare applications: review and future directions. *Frontiers in Physiology*. 2024, vol. 15. DOI: 10.3389/fphys.2024.1386760.
4. De Büscher A., Kugler J. The effectiveness of clinical pathways in inpatient settings – an umbrella review. *Journal of Public Health*. 2024, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s10389-024-02227-w.
5. Petrov K. E., Chalyi T. V. Sytuatsiina model medychnoho biznes-protsesu [Situational model of a medical business process]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii: zb. nauk. prats [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: System analysis, control and information technology: Collection of scientific papers]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2024, no. 1. DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.17. (In Ukr.)
6. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D. Clinical pathways: A systematic review of definitions, components, and applications. *Health Policy*. 2019, vol. 123, no. 12, pp. 1223–1232.
7. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin, Springer Publ., 2018. 527 p.

8. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012, vol. 34, pp. 124–134.
9. Van der Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. 2nd ed. Berlin, Springer Publ., 2016. 467 p.
10. Petrocelli J. V. Pitfalls of Counterfactual Thinking in Medical Practice: Preventing Errors by Using More Functional Reference Points. *Journal of Public Health Research*. 2013, vol. 2:e24, pp. 136–143.
11. Wachter S., Mittelstadt B., Russell C. Counterfactual Explanations without Opening the Black Box: Automated Decisions and the GDPR. *Harvard Journal of Law & Technology*. 2018, vol. 31, no. 2, pp. 841–887.
12. Pearl J., Mackenzie D. *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*. New York, Basic Books Publ., 2018. 432 p.
13. Mothilal R. K., Sharma A., Tan C. Explaining Machine Learning Classifiers through Diverse Counterfactual Explanations. *Proc. of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT 2020)*. 2020, pp. 607–617. DOI: 10.1145/3351095.3372850.
14. Van Looveren A., Klaise J., Vacanti G., Coca A. Interpretable Counterfactual Explanations Guided by Prototypes. *Proc. of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML PKDD 2021)*. 2021, pp. 650–665.
15. Chala O. V. Pobudova temporalnykh pravyl dlia predstavleniia znan v informatsiinykh systemakh upravlinnia [Building temporal rules for knowledge representation in information control systems]. *Suchasni informatsiini systemy [Advanced Information Systems]*. 2018, vol. 2, no. 3, pp. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09. (In Ukr.)
16. Chala O. V. Model uzahalnenoho predstavleniia temporalnykh znan v intelektualnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia [Model of generalized representation of temporal knowledge in intelligent information control systems]. *Suchasni informatsiini systemy [Advanced Information Systems]*. 2020, vol. 4, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. (In Ukr.)

Надійшла (received) 17.03.2026

Прийнята (accepted) 02.04.2026

Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.9

K. E. PETROV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Information Control Systems, Kharkiv, Ukraine; e-mail: kostiantyn.petrov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-711X>

T. V. CHALYI, PhD student of the Department of Information Control Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, taras.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3796-5810>

COUNTERFACTUAL MODEL OF A MEDICAL BUSINESS PROCESS

The subject of the research is medical business processes. The aim of the work is to develop a counterfactual model of a medical business process in order to enable the selection of alternative decisions when providing primary medical care, subsequent outpatient treatment, as well as clinical pathways and rehabilitation. Achieving this aim is oriented towards ensuring the flexibility of medical business processes under resource, financial, and regulatory constraints. To achieve the aim, the following tasks are addressed: to develop the formal structure of a counterfactual model of a medical business process as an extension of a situational model of a generalized medical business process, including causal dependencies and a system of temporal rules that describe admissible event sequences and time intervals between them; to perform an experimental validation of a system of clinical constraints that defines the space of possible counterfactual scenarios. A counterfactual model of a medical business process is proposed which, in contrast to existing approaches, combines the situational structure of a medical business process, a causal graph of reasons for performing process actions, a system of constraints that determine the feasibility of process trajectories in accordance with clinical guidelines, as well as temporal rules that define the sequence of medical business process events in time. Experimental validation of the model, taking into account the system of constraints, the causal graph, and the temporal rules, has confirmed a reduction in the share of clinically unacceptable scenarios compared to the traditional approach to constructing counterfactual explanations. Further development of the proposed counterfactual model of a medical business process is associated with the design of an information technology for decision support in medical business processes, aimed at constructing individualized treatment pathways that take into account patient needs and the constraints of the healthcare system.

Keywords: medical business process; counterfactual model; situational model; structural causal model; temporal rules; clinical constraints; temporal constraints; individualized treatment.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Петров Костянтин Едуардович / Petrov Kostiantyn Eduardovych

Автор 2 / Author 2: Чалий Тарас Володимирович / Chalyi Taras Volodymyrovych

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

INFORMATION TECHNOLOGY

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.07

UDC 004.932:004.8

S. V. KOVALENKO, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: serhii.kovalenko@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-0862>

S. M. KOVALENKO, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: svitlana.kovalenko@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6770-6778>

T. E. ALEKSANDROVA, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: tetyana.aleksandrova@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-0669>

M. M. MALKO, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: maxim.malko@khi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0125-2141>

AUTOMATED OBJECT SEGMENTATION AND BACKGROUND REMOVAL IN MULTIMEDIA CONTENT PROCESSING SYSTEMS

In today's rapidly developing digital technologies, image processing occupies a key place in the fields of computer vision and graphics. One of the most popular tasks is the automatic separation of foreground objects from the background, which is of critical importance for web design, e-commerce, the advertising industry, and augmented reality systems. Traditional manual editing methods are laborious and dependent on user experience, especially when working with complex textures or fuzzy object boundaries. The development of deep learning methods make it possible to automate these processes, providing high accuracy and speed of processing in real time. The aim of the work is to analyze existing algorithms for automatic background removal and develop an effective methodology for object segmentation using modern computer vision models to improve the quality of multimedia content. The work uses a comprehensive approach based on the use of the hybrid neural network architecture BEN2. The key feature of the method is the implementation of an innovative Confidence Guided Matting pipeline, which implements a two-stage Bayesian approach: first, coarse segmentation (BEN Base) is performed to create a "draft" mask, and then targeted refinement of boundaries in areas of low confidence of the model (BEN Refiner). As part of the research, a software application based on the Streamlit framework was developed, which provides automated inference of the BEN2 model. The system supports loading images in popular graphic formats, batch data processing, and visualization of results using an interactive slider. The high efficiency of the algorithm was experimentally confirmed: for complex objects, the architecture provides accurate matting of hair and small details, minimizing artifacts such as "ragged edges". The processing workflow was optimized by using local caching of models and supporting acceleration on GPU/CPU. The proposed approach based on the BEN2 architecture and boundary refinement mechanisms demonstrated higher accuracy compared to classical one-stage segmentation methods. The developed system is scalable and suitable for integration into real multimedia processing information systems, which allows significantly reducing the time for preparing graphic content and increasing its professional level.

Keywords: multimedia content processing, automatic background removal, image segmentation, deep learning, alpha matting, BEN2 architecture.

Introduction. In today's rapidly developing digital technologies and multimedia systems, image processing occupies an important place in the fields of computer vision, graphics, and information technology. One of the key tasks of visual data processing is the automatic separation of foreground objects from the background [1], which has wide practical applications in web design, e-commerce, digital photography, the advertising industry, and augmented reality systems.

Traditional background removal methods involve manual image editing, which is laborious, requires specialized skills, and is time-consuming. Processing images with complex background textures, uneven lighting, or blurred object boundaries is particularly challenging. In such cases,

the accuracy and quality of the result largely depend on the user's experience.

With the development of machine learning methods and deep neural networks, effective approaches to automating the background removal process have emerged. Modern algorithms enable high-precision image segmentation, ensuring rapid object detection even in complex scenes.

The relevance of the research is due to the need to improve the efficiency and quality of automatic background removal in images, as well as the development of universal algorithms capable of working in real time and adapting to different types of input data.

© Kovalenko S. V., Kovalenko S. M., Aleksandrova T. E., Malko M. M., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



Current State of the Problem. The background of an image is an important visual component that significantly affects the user's perception of graphic content [2]. Excessive saturation, complexity, or the presence of extraneous details in the background can lead to distraction and a decrease in the informational value of the main object. This is especially true for applied tasks, such as creating advertising materials, profile images, or content for web resources, where a clear visual hierarchy is required.

Modifying or replacing the background allows you to improve the aesthetic characteristics of the image, ensure focus on the target object and achieve stylistic consistency in a series of graphic materials. In addition, background correction helps to improve the adaptability of images to different display formats (web, printed materials) and ensures compliance with specified thematic or design requirements. Thus, changing the background acts not only as a means of visual editing, but also as a tool for improving the quality and professional level of digital content.

The study of the problem of removing and replacing the background of images is based on a wide range of scientific sources, covering both classical methods of digital image processing and modern approaches to computer vision using deep learning. The fundamental principles of image segmentation are outlined in works devoted to image analysis and pattern recognition. In [3, 4], basic methods of image processing are considered, including threshold segmentation, filtering and contour extraction. These approaches became the basis for the further development of more complex algorithms.

With the development of machine learning methods, considerable attention is paid to the use of convolutional neural networks for segmentation tasks. An important milestone was the introduction of the U-Net architecture [5], which provides high segmentation accuracy due to the symmetric encoder-decoder structure and the use of skip connections. Further research, such as works [6, 7], is aimed at the development of fully convolutional networks (FCNs) and SegNet-type architectures.

Modern sources also highlight the use of hybrid models that combine convolutional networks with attention mechanisms or transformer architectures. In [8], the Vision Transformer (ViT) is presented, which demonstrates high efficiency in image analysis tasks due to the global contextual representation of data.

A separate group of sources is made up of applied research devoted to automatic background removal in real-world conditions [9]. Such works analyze the problems of complex scenes, non-uniform illumination, and translucent objects, and also propose methods for increasing segmentation accuracy by using additional features and post-processing.

Thus, the analysis of scientific sources indicates the evolution of approaches to solving the segmentation problem: from classical image processing algorithms to modern deep learning methods. Despite significant achievements, the issues of increasing the accuracy, speed, and versatility of background removal algorithms remain relevant, which determines the feasibility of further research in this area.

Problem Statement. The relevance of this research is due to the need to develop effective algorithms for automatic background removal that combine high accuracy, speed, and versatility of application in conditions of limited resources and a variety of input data.

The aim of the work is to analyze existing algorithms for automatic background removal in images and develop an effective methodology for object segmentation using modern computer vision and machine learning methods.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

- to formalize the problem of background selection in digital images;
- conduct research on classical digital processing methods and modern algorithms based on deep learning for background removal;
- to justify the use of the hybrid neural network model BEN2 (Background Erase Network) [10] as a basic tool for high-precision segmentation;
- ensure the implementation of the Confidence Guided Matting (CGM) pipeline for targeted processing of areas where the model has a low level of confidence;
- to justify the use of a combined loss function that combines weighted BCE, IoU, and SSIM metrics to improve local and global segmentation features;
- create a practical application based on the Streamlit framework;
- to evaluate the effectiveness of the developed approach using object accuracy and edge sharpness metrics in various application scenarios.

The object of research is the process of processing digital images in the tasks of segmentation and background removal.

The subject of research is algorithms and methods for automatic background removal in images, in particular approaches based on computer vision and deep learning.

Main Section. Removing the background from an image is widely used in many areas:

- e-commerce and advertising – photos of products on a white or neutral background for online stores, advertising banners and product catalogs;
- graphic design – creating collages and posters, developing logos and branding materials, infographics and presentations;
- photography and media – portrait photos for documents or social networks, replacing the background with a more aesthetic or thematic one, photo processing for magazines and news sites;
- video conferencing and streaming – virtual background in Zoom, Teams, Google Meet, chroma key effects without a green screen;
- gaming industry and 3D applications – cutting sprites and textures for games, preparing references for 3D modeling;
- medicine and science – isolation of objects in microscopic images, processing of medical images (X-ray, MRI);
- documents and identification – passport photos, visas, passes, digital signatures and seals;

- fashion and beauty – photos of clothes and accessories for lookbooks, image processing for fashion websites.

The process of image background removal is based on segmentation tasks, which can be implemented using different methods depending on the complexity of the scene and the chosen software tool. The main approaches include:

1) Manual segmentation – involves the user selecting the object using precise geometric marking tools (e.g., polygonal contours or Bezier curves). This approach provides high accuracy, but is time-consuming and depends on the operator's skills.

2) Automated segmentation – implemented using computer vision and artificial intelligence methods, in particular convolutional neural networks (CNN), which perform pixel classification and object separation from the background without user intervention. This approach is characterized by high processing speed and ease of use.

3) Combined methods – combine automatic segmentation with subsequent manual refinement of the result, which allows achieving a balance between speed and accuracy.

The choice of method depends on the requirements for the quality of the result: for mass image processing, it is advisable to use automated approaches, while for tasks requiring high accuracy (for example, catalog products or design), manual or combined processing is preferred.

The effectiveness of background removal is largely determined by the characteristics of the input image. To achieve a high-quality result, it is advisable to consider the following recommendations:

- use images with uniform and sufficient lighting that ensures the clarity of the object's contours;
- avoid using images with low resolution or significant blur;
- provide contrast between the object and the background to simplify the segmentation task;
- use graphic formats with alpha channel support to preserve transparency;
- when processing manually, use scaling to increase the accuracy of boundary selection.

The work uses a comprehensive approach to solving the problem of automatic background removal, which includes computer vision, mathematical modeling, and deep learning methods. The basis of the research is image segmentation methods using the hybrid BEN2 architecture.

BEN2 implements a new approach to foreground segmentation through an innovative CGM pipeline. The model does not simply “draw a mask” around the object, but first analyzes where it is uncertain, and only then refines these areas in a targeted manner. The BEN architecture consists of two components: BEN Base is used for initial segmentation (makes a first “draft”: divides the image into foreground and background) and BEN Refiner for confidence-based refinement, while purposefully processing pixels where the base model demonstrates a lower level of confidence, which gives more accurate and reliable matting results.

The Multi-view Aggregation Network (MVANet) shows significant potential in dichotomous image seg-

mentation (DIS) using a multi-view learning approach. The BEN2 architecture takes this architecture as a base, but introduces important changes. BEN Base repeats MVANet, but with notable changes: the activation function is replaced (GELU – Gaussian Error Linear Unit is used as the activation function instead of ReLU and PReLU from the original MVANet) and normalization (instance normalization is chosen) [11].

Let the input image be given:

$$I \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}, \quad (1)$$

where H, W are image height and width;

C is number of channels (usually $C=3$ is True Color format for RGB model).

The task of segmentation is to find a function

$$f_{\theta}(I) = M, \quad (2)$$

where f_{θ} is parameterized model;

θ is a set of parameters;

$M \in \{0,1\}^{H \times W}$ is a binary mask that separates the object (1) from the background (0).

Final image with transparent background:

$$F = I \odot M, \quad (3)$$

where \odot is element-wise multiplication.

In segmentation and background removal tasks, the key step is to determine the exact boundaries between the foreground object and the background. For this, the BEN2 architecture uses the alpha matting operation, which allows you to simulate semi-transparent transitions between image areas and improve the quality of contour extraction. In this case, we are dealing with real edges that are not binary – each pixel is described by the equation:

$$I_p = \alpha_p F_p + (1 - \alpha_p) B_p, \quad \alpha_p \in [0,1], \quad (4)$$

where F_p is foreground color;

B_p is background color;

α_p is opacity mask.

From (4) the problem arises – to estimate α_p for each pixel. To solve the problem, the model predicts using a trained neural network $\hat{M} = f_{\theta}(I)$.

In the BEN2 architecture, the matting operation is integrated as a separate boundary refinement module, which works on the basis of a previously obtained segmentation map. The main stages are:

1) Coarse segmentation – in the first stage, the convolutional neural network forms a confidence map (probabilistic map of the object)

$$C_p = 1 - 2 \left| \hat{M}_p - 0.5 \right|. \quad (5)$$

The closer \hat{M}_p up to 0.5, the lower the confidence.

2) Border region selection – an uncertainty region (trimap) is determined, which includes: a clear foreground ($\alpha \approx 1$), clear background ($\alpha \approx 0$) and an undefined region (transition zone).

3) Alpha channel estimation – for pixels in an undefined area, a neural network or specialized submodule estimates the value α taking into account local textural features, intensity gradients, and contextual information.

4) Boundary enhancement – the resulting alpha mask is used to smooth contours and eliminate artifacts such as “ragged edges”.

To train the matting module in BEN2, a combined loss function is used, combining three components: weighted BCE (Binary Cross Entropy), weighted IoU (Intersection-over-Union), and weighted SSIM (Structural Similarity Index):

$$L = \alpha_1 L_{BCE} + \alpha_2 L_{IoU} + \alpha_3 L_{SSIM}. \quad (6)$$

It is designed to capture local, global, and token-level segmentation features.

Binary cross-entropy (local pixels) is calculated using

$$L_{BCE} = -\sum_p \omega_p (M_p \log M_p + (1 - M_p) \log(1 - \hat{M}_p)). \quad (7)$$

Intersection over Union (global pixels) is calculated

$$L_{IoU} = 1 - \frac{\sum_p \omega_p \hat{M}_p M_p}{\sum_p \omega_p (\hat{M}_p + M_p - \hat{M}_p M_p)}, \quad (8)$$

where $\omega_p = 1 + \gamma(1 - C_p)$ is weight, larger for uncertain pixels.

BEN2 was trained on DIS5K [12] and its own proprietary dataset of 22,000 images for segmentation. The improved model demonstrates improved performance in hair matting, 4K processing, object segmentation, and edge refinement.

Thus, BEN2 [13] is a two-stage Bayesian approach that includes first a coarse segmentation with a confidence assessment, and then targeted refinement where the model is “in doubt.” This is what makes this approach more efficient than classical one-stage methods.

After removing the background, you can perform post-processing of the object boundaries. In particular, it is recommended to apply feathering or edge filtering techniques to eliminate artifacts such as “torn” contours or residual background pixels.

Fig. 1 shows a block diagram of the system, illustrating its step-by-step algorithm of operation.

The process begins with launching the application, followed by loading the interface. After loading the image, the system checks whether the model is already available locally. If the answer is negative, the model is downloaded, if positive, the local copy is used. This stage is critical for optimizing response time and reducing network load.

For each image, the BEN2 model is inferred, after which the result is converted to RGBA format (alpha channel extraction). The obtained results are stored in the internal session state, which allows avoiding repeated calculations and maintaining UI interactivity. The system displays the results using an interactive “before/after” slider.

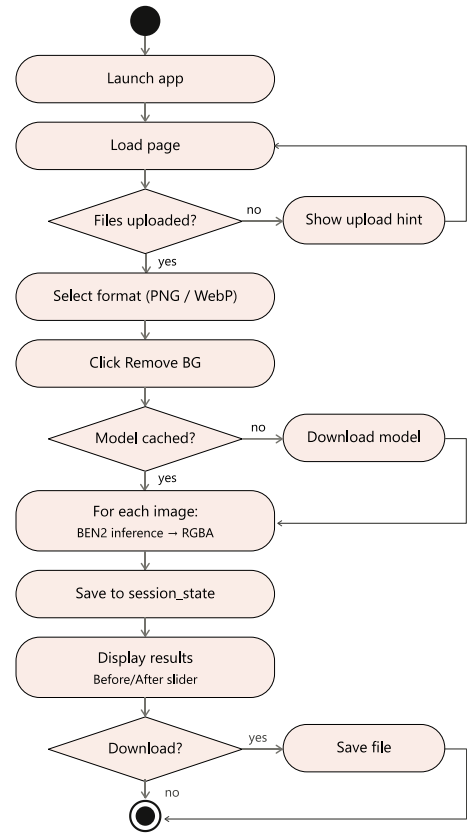


Fig. 1. Flowchart of the system operation based on the BEN2 model architecture

The activity diagram (Fig. 2) details the interaction between three main components: the user, the interface (Streamlit) and the processing module. The user performs the following sequence: opening the application, loading images, selecting the format, starting processing. These actions initiate further processes in the system.

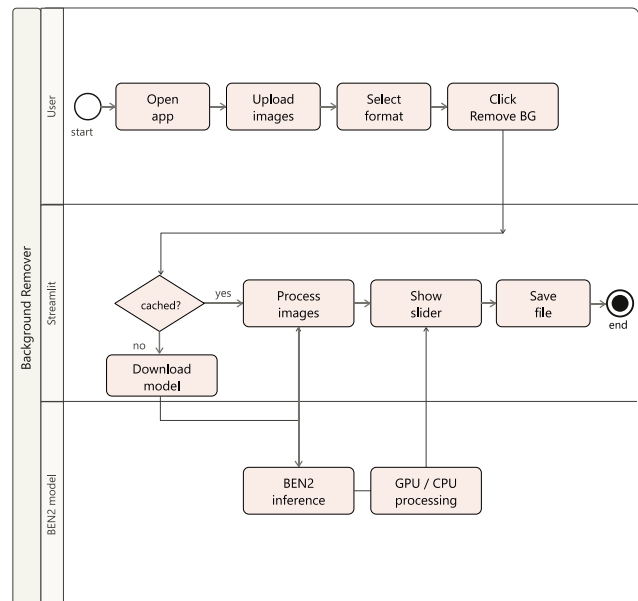


Fig. 2. Activity diagram of the automated background removal process

Streamlit-level logic accepts input data, passes it to the computational module, coordinates inference calls, and displays the results.

Processing at the Background Remover level involves checking the cache, loading the model (if necessary), performing batch image processing (Process images). The BEN2 module receives the image, performs foreground segmentation, uses the GPU or CPU (GPU/CPU processing), returns the result as a mask or RGBA image. In the final step, the results are transmitted to the UI, an interactive slider is displayed, and the user can save the files.

The data flow between the program components is shown in Fig. 3.

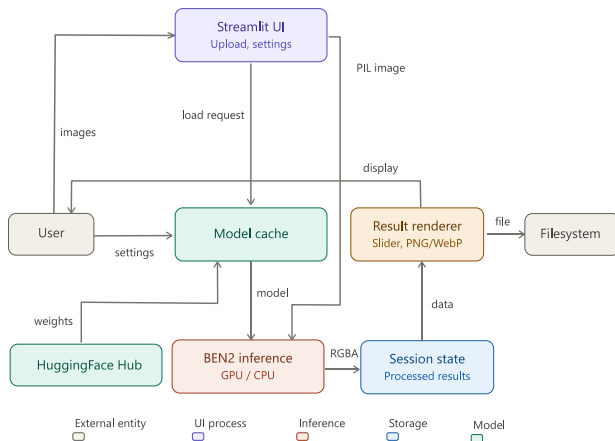


Fig. 3. Data flow between application components

The system architecture is built on a modular principle and includes components of the user interface, data processing, model inference, and results storage.

The user interface is implemented using the Streamlit web framework [14] and provides: loading images; setting processing parameters (output file format, computing device); initiating the processing process (forming a load request); displaying results in the form of an interactive comparison. Loaded images are transferred as PIL (Python Imaging Library) format objects, which provides unified processing of graphic data.

The Model cache module performs the function of centralized management of the model and its weights. The main tasks it solves are: loading model weights from an external repository (HuggingFace Hub); caching the model in RAM for reuse; transferring the model to the inference module; processing parameters received from the user. The use of caching allows you to significantly reduce the time of recalculations and increase system performance.

The central component of the system is the inference module, which implements image processing using the BEN2 model. The main functions: receiving a pre-processed image; performing object segmentation; forming an alpha mask; using hardware acceleration (GPU via CUDA or CPU). The result of the module is an image with a removed background in RGBA format, where the alpha channel is responsible for transparency.

The Session state module is responsible for temporarily storing processing results within the user session. It allows you to accumulate processed images; transfer data

to the display module; support batch processing (multiple images); save intermediate results for repeated access. This module allows you to avoid repeated calculations when the user interacts with the interface.

The Result renderer module is responsible for the visualization and export of results. Its capabilities include: displaying results as an interactive slider; preparing files for saving; transferring results to the file system. Interaction with the file system allows the user to save results locally.

Experiment. As part of the research, a software application was developed for automated background removal from digital images based on modern computer vision and deep learning methods. The system is based on the BEN2 neural network model, which provides high-precision segmentation of objects with further refinement of boundaries using alpha matting mechanisms.

The data upload module allows the user to import images via a drag-and-drop interface or select files from the file system. Popular graphic formats (JPG, JPEG, PNG, WEBP, BMP) are supported with a file size limit of 200 MB (Fig. 4).

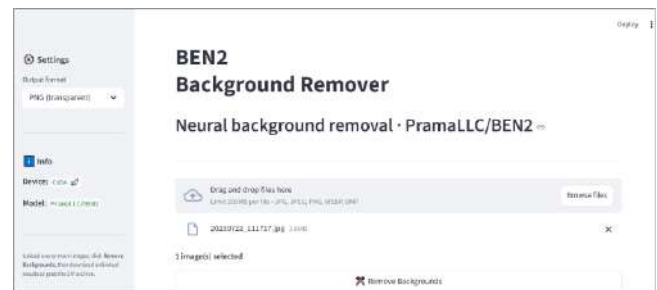


Fig. 4. Graphical user interface (GUI) for single and batch image uploading

The preprocessing module performs image normalization, resolution change, and data preparation for feeding into the neural network. This ensures the stability of the model regardless of the input image parameters.

The segmentation module (the core of the system) implements the inference of the BEN2 model, which includes the initial segmentation of the object; determination of border regions; refinement of boundaries using boundary enhancement mechanisms.

The results visualization module provides the user with the ability to compare the original and processed images (before/after mode), and also displays additional quality metrics, including: object accuracy coefficient; boundary clarity indicator (Fig. 5).

For this example (Fig. 5), the object accuracy coefficient is 77 %, and the edge sharpness index is 59.1, which indicates a fairly good sharpness of the image edges in the image with the background removed.

The results export module allows you to save processed images in PNG format with transparency support or as an archive (ZIP) for batch processing.

A demonstration of batch processing is shown in Fig. 6 and Fig. 7.

Conclusions. Based on the results of the study, the following conclusions can be drawn:

A thorough analysis of existing approaches to automatic background removal has been conducted – from

classical threshold segmentation methods to modern deep learning-based architectures such as U-Net and ViT.

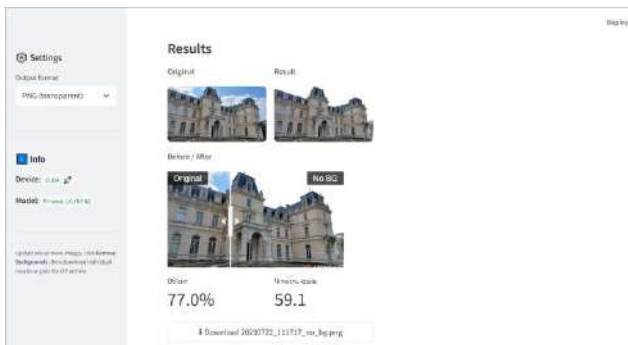


Fig. 5. Segmentation results visualization: “Before/After” comparison and quality metrics

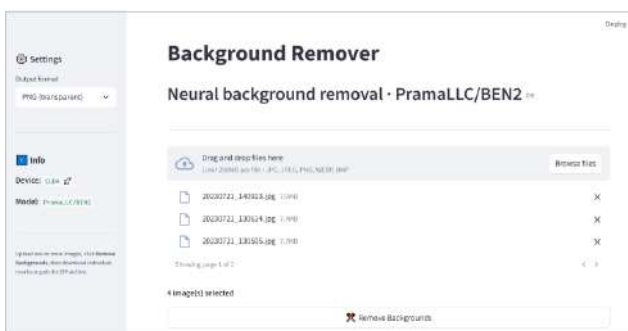


Fig. 6. Batch processing interface for multiple multimedia content files

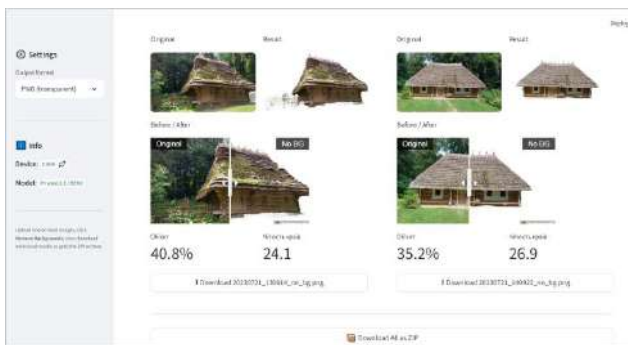


Fig. 7. Examples of automatic background removal for complex multimedia objects

The hybrid neural network architecture BEN2, which implements a two-stage approach: coarse segmentation and further refinement of boundaries using the CGM pipeline, is justified and applied.

The process of separating objects is mathematically modeled through the alpha matting equation, which allows processing translucent transitions and complex contours.

A software application based on the Streamlit framework has been developed, which integrates the BEN2 model and provides a user-friendly interface.

As a result of the research, a system was created that provides highly accurate segmentation of objects even in difficult conditions (complex background texture, uneven

lighting); batch image processing functionality was implemented, which increases the efficiency of working with large volumes of multimedia content; high-quality visualization of results was achieved using interactive elements (before/after sliders) and providing metrics of accuracy and clarity of boundaries, and the feasibility of using the proposed approach for applied areas such as e-commerce, graphic design, and media was confirmed.

Directions for further work may include: expanding the post-processing functionality, such as implementing additional feathering and edge filtering methods to completely eliminate background pixel remnants in ultra-complex scenes; optimization for mobile devices; adapting the BEN2 architecture to work on devices with limited computing resources without significant loss of accuracy; working with video content, e.g. developing an algorithm for automatic background removal in a video stream in real time, which is relevant for streaming and video conferencing, and integrating with generative AI, developing modules for automatically replacing the removed background with generative images that match the style of the target object.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT and Grammarly for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text.

References

- Weingerl P., Hladnik A., Dejana Javoršek D. Development of a machine learning model for extracting image prominent colors. *Color Research & Application*. 2020. No. 45(3), pp. 409–426. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.22485>.
- Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing. 4th ed.* New York: Pearson, 2018. 1019 p.
- Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications* (2nd Edition). Springer, 2022. 1232 p.
- Kovalenko S., Kovalenko S., Mikhnova O., Kovalenko A., Pelikh D., Severin V., "An Approach to Blood Cell Classification Based on Object Segmentation and Machine Learning," *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2023, pp. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312903.
- Chen J., Lu Y., Yu Q., Luo X., Adeli E., Wang Y., Lu L., Yuille A. L., Zhou Y. *TransUNet: Transformers Make Strong Encoders for Medical Image Segmentation*. arXiv, preprint arXiv:2102.04306, 2021. 13 p. DOI: 10.48550/arXiv.2102.04306.
- Kovalenko S. M., Kutsenko O. S., Kovalenko S. V., Kovalenko A. S. Approach to the automatic creation of an annotated dataset for the detection, localization and classification of blood cells in an image. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024, no. 1, pp. 128–139. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-12.
- Kovalenko A., Severyn V. Optimization of the architecture and hyperparameters of the U-Net model to improve the quality of biological objects segmentation. *Journal of the Ternopil National Technical University*. 2025, vol 120, no. 4, pp. 21–31. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.04.021.
- Dosovitskiy, A. An Image Is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York City, 2021, pp. 45–67.
- Khanorkar, A., Pawar, B., Singh, D., Dhanbhar, K., Mangrulkar, N. Background removal of video in realtime. *3C TIC. Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC*. 2022, vol. 11, no. 2, pp. 195–206. DOI: 10.17993/3ctic.2022.112.195-206.
- Meyer M., Spruyt J. Ben: Using confidence-guided matting for dichotomous image segmentation. arXiv preprint arXiv:2501.06230, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2501.06230.

11. *Meet BEN2, the AI Background Eraser That Actually Works And It Is Open Source*. DigiAlps LTD. Available at: <https://digiалps.com/meet-ben2-the-ai-background-eraser-that-actually-works-and-it-is-open-source/> (accessed 24.02.2026).
12. Qin X., Dai H., Hu X., Fan D. P., Shao L., Van Gool L. Highly accurate dichotomous image segmentation. *European Conference on Computer Vision*. Cham, Springer Nature Switzerland. 2022, pp. 38–56. DOI: 10.1007/978-3-031-19797-0_3.
13. *BEN2: Background Erase Network*. Available at: <https://huggingface.co/PramaLLC/BEN2> (accessed 24.02.2026).
14. Khorasani M., Abdou M., Fernández J. H. *Streamlit for Web Development: Build and Scale Secure Python-Powered Apps with Streamlit*. Apress Berkeley, CA, 2025. XXV, 413 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1826-4>.

Received 05.03.2026

Accepted 02.04.2026

Published 20.05.2026

УДК 004.932:004.8

С. В. КОВАЛЕНКО, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: serhii.kovalenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-0862>

С. М. КОВАЛЕНКО, кандидатка технічних наук, доцентка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцентка кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна; e-mail: svitlana.kovalenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6770-6778>

Т. Є. АЛЕКСАНДРОВА, докторка технічних наук, професорка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: tetyana.aleksandrova@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-0669>

М. М. МАЛЬКО, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: maxim.malko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0125-2141>

АВТОМАТИЗОВАНА СЕГМЕНТАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ВИДАЛЕННЯ ФОНУ В СИСТЕМАХ ОБРОБКИ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ

В сучасних умовах стрімкого розвитку цифрових технологій обробка зображень посідає ключове місце в галузях комп'ютерного зору та графіки. Однією з найбільш затребуваних задач є автоматичне відокремлення об'єктів переднього плану від фону, що має критичне значення для вебдизайну, електронної комерції, рекламної індустрії та систем доповненої реальності. Традиційні методи ручного редагування є трудомісткими та залежними від досвіду користувача, особливо при роботі зі складними текстурними або нечіткими межами об'єктів. Розвиток методів глибокого навчання дозволяє автоматизувати ці процеси, забезпечуючи високу точність та швидкість обробки в реальному часі. Метою роботи є аналіз існуючих алгоритмів автоматичного видалення фону та розробка ефективної методології сегментації об'єктів із використанням сучасних моделей комп'ютерного зору для підвищення якості мультимедійного контенту. У роботі застосовано комплексний підхід, що базується на використанні гібридної нейромережевої архітектури BEN2. Ключовою особливістю методу є впровадження інноваційного конвеєра Confidence Guided Matting, який реалізує двоетапний байєсівський підхід: спочатку виконується груба сегментація (BEN Base) для створення «чернетки» маски, а потім прицільне уточнення меж у зонах низької впевненості моделі (BEN Refiner). У межах дослідження розроблено програмний застосунок на базі фреймворку Streamlit, який забезпечує автоматизований інференс моделі BEN2. Система підтримує завантаження зображень у популярних графічних форматах, пакетну обробку даних та візуалізацію результатів за допомогою інтерактивного слайдера. Експериментально підтверджено високу ефективність алгоритму: для складних об'єктів архітектура забезпечує точне матування волосся та дрібних деталей, мінімізуючи артефакти типу «рваних країв». Процес обробки оптимізовано шляхом використання локального кешування моделей та підтримки прискорення на GPU/CPU. Запропонований підхід на основі архітектури BEN2 та механізмів уточнення меж продемонстрував вищу точність порівняно з класичними одноетапними методами сегментації. Розроблена система є масштабованою та придатною для інтеграції в реальні інформаційні системи обробки мультимедіа, що дозволяє значно скоротити час підготовки графічного контенту та підвищити його професійний рівень.

Ключові слова: обробка мультимедійного контенту, автоматичне видалення фону, сегментація зображень, глибоке навчання, альфа-матування, архітектура BEN2.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Коваленко Сергій Володимирович / Kovalenko Serhii Volodymyrovych

Автор 2 / Author 2: Коваленко Світлана Миколаївна / Kovalenko Svitlana Mykolayivna

Автор 3 / Author 3: Александрова Тетяна Євгенівна / Aleksandrova Tetyana Evgenivna

Автор 4 / Author 4: Малько Максим Миколайович / Malko Maksym Mykolayovych

А. В. КУДРЯШОВА, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри систем віртуальної реальності, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: alona.v.kudriashova@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0496-1381>

Т. І. ОЛІЯРНИК, аспірант кафедри комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: taras.i.oliiarnyk@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0873-6674>

Ю. Б. СЛІПЕЦЬКИЙ, аспірант кафедри комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: yurii.b.slipetskiy@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6931-6767>

ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті розглянуто актуальну задачу проєктування інформаційної системи для автоматизованого опрацювання растрових зображень. Обґрунтовано необхідність підвищення ефективності опрацювання зображень в умовах зростання обсягів візуальних даних та вимог до стабільності їх якості. Визначено основні операції опрацювання, зокрема імпорт графічної інформації, корекцію кольору, усунення шумів і дефектів, масштабування та кадрування. Описано обмеження існуючих програмних засобів, що орієнтовані переважно на ручне або напівавтоматичне редагування. Запропоновано підхід до побудови інформаційної системи на основі функціонального моделювання. Структурування процесу опрацювання виконано з використанням нотації IDEF0. Дана нотація забезпечує формалізацію взаємозв'язків між вхідними даними, керуючими впливами, механізмами та результатами. Побудовано контекстну діаграму та реалізовано її декомпозицію, у результаті чого виділено основні підпроцеси. Визначено інформаційні потоки між підпроцесами та умови переходу між етапами опрацювання. Розроблено алгоритм функціонування системи у вигляді псевдокоду, що охоплює повний цикл опрацювання зображень. Алгоритм передбачає перевірку формату та цілісності файлів, аналіз метаданих, нормалізацію параметрів, ітеративну корекцію якості, виявлення та усунення дефектів, а також масштабування і кадрування. Реалізовано механізм раннього відбракування некоректних даних, що зменшує витрати обчислювальних ресурсів. Запропоновано адаптивний цикл корекції, який забезпечує досягнення заданих показників якості без фіксованої кількості ітерацій. Передбачено ведення журналу операцій для контролю та відстеження результатів опрацювання. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої системи для автоматизованого опрацювання растрових зображень у різних прикладних сферах. Застосування системи дозволяє підвищити продуктивність опрацювання зображень, забезпечити узгодженість параметрів якості та зменшити потребу в ручному втручанні. Визначено обмеження, пов'язані з ітеративним характером алгоритму та підтримкою форматів. Окреслено напрями подальших досліджень, зокрема інтеграцію методів машинного навчання та розширення функціональних можливостей системи.

Ключові слова: інформаційна система, проєктування, растрове зображення, функціональне моделювання, модель, алгоритм, композиція.

Вступ. Опрацювання зображень має важливе значення в багатьох сферах діяльності, зокрема у вебдизайні [1], поліграфії [2], медіаіндустрії [3], комп'ютерному баченні [4] та наукових дослідженнях [5]. Значні обсяги візуальної інформації потребують ефективних засобів автоматизованого опрацювання, які здатні забезпечити високу якість результатів при мінімальних витратах часу та ресурсів [6, 7].

Растрові зображення, як один із найпоширеніших форматів подання графічних даних, часто потребують попереднього опрацювання, зокрема корекції кольору, усунення шумів і дефектів, масштабування та кадрування [8]. Наявні програмні засоби здебільшого орієнтовані на ручне або напівавтоматичне редагування, що обмежує їх ефективність при опрацюванні великих масивів даних або необхідності забезпечення стабільних параметрів якості.

Складність опрацювання растрових зображень зумовлена різноманітністю їх форматів, параметрів та умов отримання. Зображення можуть відрізнятися за роздільною здатністю, колірним простором, рівнем шуму та ступенем спотворень. Це ускладнює застосування універсальних методів опрацювання. Крім того, забезпечення узгодженості параметрів якості вимагає використання формалізованих підходів до керування процесом опрацювання.

Ефективне опрацювання зображень полягає у поєднанні кількох взаємопов'язаних етапів, які повинні виконуватися у визначеній послідовності. Відсутність цілісної організації цих етапів призводить до втрати якості результатів або перевитрат обчислювальних ресурсів. Тому актуальним є підхід, що базується на системному представленні процесу опрацювання та дозволяє забезпечити керованість і відтворюваність результатів.

Важливим є також необхідність формалізації процедур опрацювання зображень у вигляді моделей та алгоритмів. Це дає змогу чітко визначити структуру системи, встановити взаємозв'язки між її компонентами та забезпечити можливість подальшої автоматизації. Застосування функціонального моделювання дозволяє представити процес опрацювання як сукупність взаємопов'язаних підпроцесів із визначеними входами, виходами та механізмами реалізації.

У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення інформаційної системи, що здатна автоматизувати процес опрацювання растрових зображень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження у сфері опрацювання цифрових зображень зосереджені на підвищенні якості візуальних даних та автоматизації відповідних процесів. Значна увага приділяється розробленню алгоритмів корекції

© Кудряшова А. В., Оліярник Т. І., Сліпецький Ю. Б., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



кольору, усунення шумів і покращення деталізації зображень. У роботах [9, 10] розглянуто підходи до підвищення якості растрових зображень на основі цифрового опрацювання сигналів. Запропоновано методи адаптивної фільтрації, що дозволяють зменшити вплив шумів без втрати важливих деталей.

У [11] досліджено програмні засоби для автоматизованого редагування зображень. Описано функціональні можливості сучасних графічних редакторів та систем пакетного опрацювання, які забезпечують виконання типових операцій без участі користувача. Особливу увагу приділено оптимізації процесів масштабування та перетворення форматів.

Робота [12] присвячена застосуванню методів штучного інтелекту в опрацюванні зображень. Розглянуто використання нейронних мереж для задач шумопригнічення, відновлення пошкоджених ділянок і автоматичної корекції параметрів зображення. Визначено переваги таких підходів, зокрема підвищення точності опрацювання та зменшення потреби в ручному налаштуванні параметрів. Водночас у [13] зазначено, що використання складних моделей машинного навчання потребує значних обчислювальних ресурсів і не завжди гарантує стабільність результатів для різних типів зображень.

Окремі дослідження спрямовані на аналіз структурних складових процесу опрацювання зображень. У [14] запропоновано моделі оцінювання якості зображень на основі сукупності об'єктивних показників, таких як різкість, контрастність і рівень шуму. Результати роботи дозволяють формалізувати критерії оцінювання якості та використовувати їх у автоматизованих системах. У [15] розглянуто алгоритмічні підходи до масштабування та інтерполяції зображень із збереженням деталей, що є важливим для забезпечення коректного відображення графічної інформації.

Попри значну кількість досліджень, більшість із них орієнтована на вирішення окремих задач опрацювання зображень. Питання комплексної організації процесу опрацювання в межах єдиної інформаційної системи, що поєднує різні етапи обробки та забезпечує узгодженість параметрів якості, залишається недостатньо дослідженим.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є проектування інформаційної системи для корекції, ретушування, масштабування та кадрування растрових зображень

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі основні завдання:

- розробити функціональні моделі опрацювання растрових зображень;
- розробити алгоритм інформаційної системи опрацювання растрових зображень.

Функціональні моделі опрацювання растрових зображень. Структурування процесу опрацювання растрових зображень виконано засобами функціонального моделювання в нотації IDEF0 [16]. Ця методологія забезпечує чітке розмежування між тим, що виконує система, за рахунок чого це відбувається та якими обмеженнями регулюється виконання. Побудова моделі здійснювалась ієрархічно, тобто від загального опису

системи на контекстному рівні до деталізованого подання окремих підпроцесів.

Контекстна діаграма (рис. 1) фіксує зовнішні межі системи та визначає її місце у ширшому організаційному та технологічному середовищі. Центральний блок А-0 уособлює увесь процес опрацювання растрових зображень як єдину неподільну функцію, не розкриваючи її внутрішньої будови.

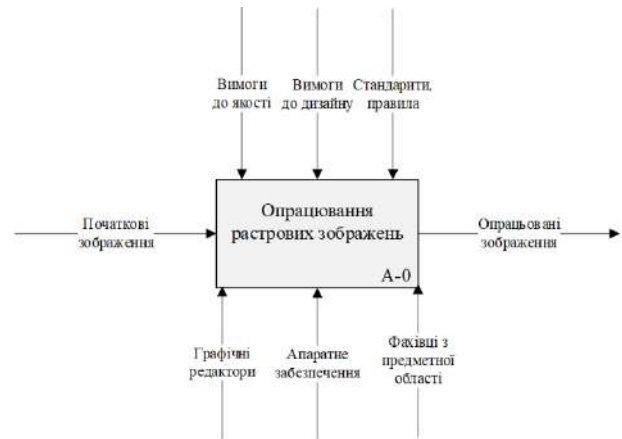


Рис. 1. Контекстна діаграма

До системи надходять початкові зображення – растрові файли різних форматів, що підлягають подальшій трансформації. Результатом є опрацьовані зображення, якість і вигляд яких відповідають встановленим критеріям. Три категорії керуючих впливів визначають правила виконання роботи. Механізмами уможливають реалізацію процесу.

Розгортання контекстного блоку на рівні А0 (рис. 2) виявляє чотири функціональні підпроцеси, між якими циркулюють проміжні інформаційні потоки.

Блок А1 є точкою входу системи. Тут виконується завантаження файлів, верифікація їх відповідності вимогам до якості та нормалізація вихідних параметрів. Блок відсіює непридатні для опрацювання матеріали ще до початку основного технологічного циклу. Це суттєво скорочує витрати ресурсів на подальших стадіях. Блок А2 реалізує налаштування тонального та кольорового простору зображення. Фахівці з предметної галузі, спираючись на вимоги до дизайну, коригують яскравість, контраст, кольорну температуру та насиченість. У результаті одержуються відкориговані зображення, які передаються до блоків А3 та А4. Блок А3 орієнтований на локальне усунення технічних дефектів: артефактів стиснення, імпульсного шуму, оптичних аберацій та фізичних пошкоджень вихідного матеріалу. Контроль за результатами ретушування здійснюється відповідно до стандартів і правил, що забезпечує від надмірного втручання в структуру зображення. Блок А4 завершує технологічний ланцюжок: зображення набуває цільових геометричних параметрів (розмірів і пропорцій) відповідно до вимог. На виході формуються фінальні опрацьовані зображення, готові до використання або публікації.

Якщо результат будь-якого підпроцесу не задовольняє встановлені вимоги, відповідний матеріал повертається на попередній етап для повторного опрацювання.

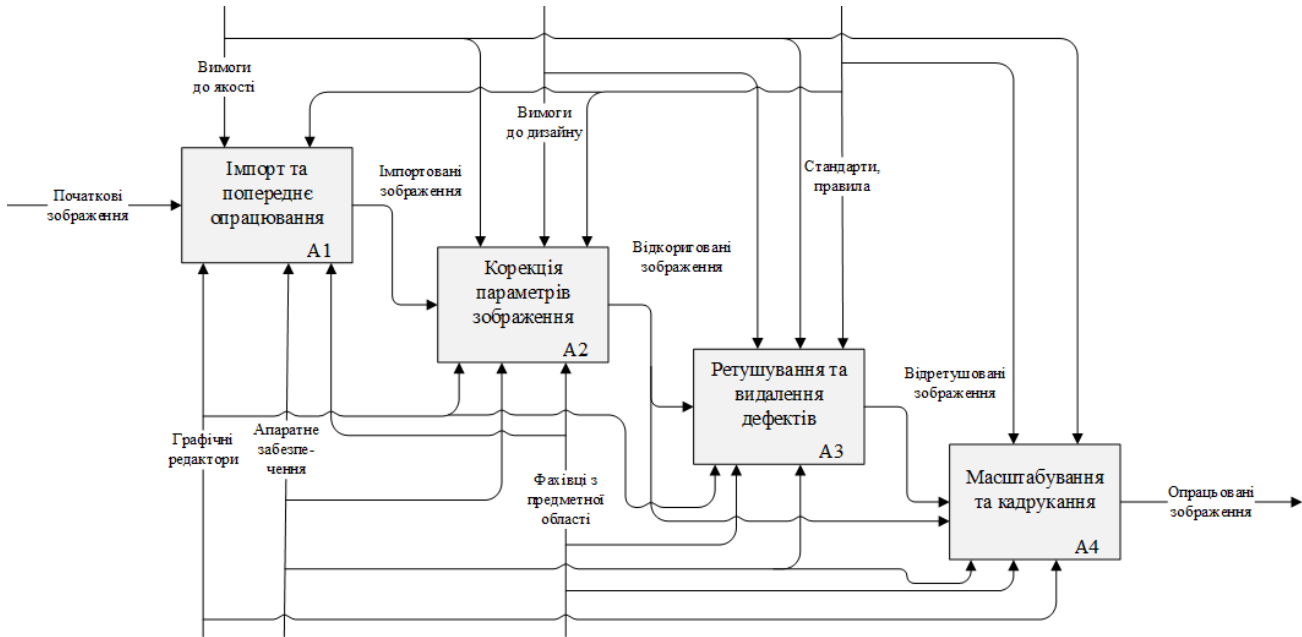


Рис. 2. Декомпозиція контекстної діаграми

Алгоритм інформаційної системи для опрацювання растрових зображень. Для розкриття процедурної логіки інформаційної системи, її функціональну поведінку формалізовано у вигляді псевдокоду, представленого в Алгоритмі 1. Алгоритм охоплює повний цикл опрацювання зображень.

Алгоритм 1: Опрацювання растрових зображень в інформаційній системі

Вхідні дані: растрові зображення (формати BMP, PNG, JPEG, TIFF, RAW), параметри якості Q , параметри дизайну D , стандарти S

Вихідні дані: опрацьовані зображення R , журнал операцій L

- 1: **Початок**
- 2: Завантаження вхідних зображень та ініціалізація параметрів Q , D , S
- 3: **для** кожного зображення img зі вхідної множини **виконувати**
- 4: Перевірка формату та цілісності файлу img
- 5: **якщо** формат не підтримується або файл пошкоджено, **тоді**
- 6: Занести запис про помилку до журналу L ; перейти до наступного елемента
- 7: **кінець якщо**
- 8: Зчитування метаданих: роздільна здатність, кольорний простір, бітова глибина
- 9: Перевірка відповідності метаданих вимогам Q
- 10: **якщо** метадані не відповідають Q , **тоді** відхилити img ; оновити L
- 11: Нормалізація параметрів зображення відповідно до Q

- 12: **повторювати**
- 13: Корекція яскравості, контрасту, кольорового балансу відповідно до D
- 14: Застосування кольорового профілю ICC згідно з D та S
- 15: Обчислення показника якості $q = eval(img, Q)$
- 16: **доки** $q \geq Q_{min}$ **або** кількість ітерацій не перевищує N_{max}
- 17: Виявлення дефектів: шум, артефакти, пошкоджені ділянки
- 18: Застосування алгоритмів шумопригнічення (Gaussian, Median, NLM)
- 19: **якщо** виявлено артефакти або локальні пошкодження, **тоді**
- 20: Ретушування проблемних ділянок методом інпейнтингу
- 21: **кінець якщо**
- 22: Масштабування до цільових розмірів з інтерполяцією Lanczos-3
- 23: Кадрування відповідно до заданих пропорцій D
- 24: Фінальна перевірка: $q_{final} = eval(img, Q)$; **якщо** $q_{final} \geq Q_{min}$, **тоді** повторити з кроку 12
- 25: Збереження результату R у цільовому форматі згідно з S
- 26: Оновлення журналу L : час, параметри, статус операції
- 27: **кінець для**
- 28: Формування підсумкового звіту на основі L
- 29: **Кінець**

Вбудований механізм раннього відбракування (кроки 4–10) запобігає витраті ресурсів на опрацювання некоректних файлів. Адаптивний цикл корекції (кроки 12–16) забезпечує досягнення цільових показників якості без жорсткого обмеження кількості проходів. Централізоване ведення журналу *L* забезпечує можливість відстеження кожної виконаної операції.

Алгоритм відображає послідовне виконання етапів попереднього аналізу, корекції параметрів та фінального опрацювання зображення. На початковому етапі здійснюється перевірка вхідних даних і нормалізація параметрів відповідно до заданих вимог. Далі реалізується ітеративна корекція характеристик зображення з оцінюванням показника якості на кожному кроці. Після досягнення необхідного рівня якості виконуються процедури виявлення дефектів, шумопригнічення та локального відновлення пошкоджених ділянок. Завершальний етап включає геометричні перетворення, зокрема масштабування та кадрування, з подальшим збереженням результату.

Розроблений алгоритм характеризується послідовною структурою виконання та чітко визначеними умовами переходу між етапами опрацювання. Його особливістю є поєднання процедур попередньої валідації даних, ітеративного покращення якості та опрацювання зображень у межах єдиного циклу. Це забезпечує узгодженість параметрів опрацювання та стабільність отриманих результатів. Використання формалізованого опису у вигляді псевдокоду спрощує подальшу реалізацію алгоритму в програмному середовищі та його адаптацію до різних прикладних задач.

Висновки. У роботі запроєктовано інформаційну систему для опрацювання растрових зображень, яка забезпечує корекцію, ретушування, масштабування та кадрування відповідно до заданих вимог якості. Побудовано функціональні моделі в нотатції IDEF0. Це дозволило структурувати процес опрацювання зображень та виділити основні етапи роботи системи. Сформовано алгоритм опрацювання зображень у вигляді псевдокоду. Алгоритм передбачає відбракування некоректних файлів, ітеративне покращення якості зображення та усунення дефектів.

Запропонована інформаційна система може бути використана для автоматизованого опрацювання растрових зображень у різних прикладних сферах, зокрема у вебдизайні, поліграфії, цифровій фотографії та медіаіндустрії.

Слід зазначити, що запропонована система має низку обмежень. Зокрема, ітеративний характер алгоритму може призводити до збільшення часу опрацювання при досягненні високих вимог до якості. Також система обмежена підтримкою визначеного набору форматів і не враховує специфіку вузькоспеціалізованих типів зображень.

Подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на розширення функціональних можливостей запропонованої системи та підвищення рівня автоматизації. Зокрема, перспективним є впровадження методів машинного навчання для автоматичного визначення параметрів корекції та виявлення складних дефектів

зображень. Доцільним також є розширення підтримки форматів даних, інтеграція з хмарними сервісами для опрацювання великих обсягів зображень, а також реалізація інтелектуальних механізмів адаптації параметрів опрацювання залежно від типу зображення.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори не використовували генеративний штучний інтелект.

Список використаних джерел інформації

1. Reis M. J. C. S. Developments of computer vision and image processing: methodologies and applications. *Future Internet*. 2023. Vol. 15. Art. 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15070233>.
2. Грабовський С. М., Оленіч М. М. Технологічні процеси видавничо-поліграфічної справи : навчальний посібник. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. 192 с.
3. Chen Y., Sherren K., Smit M., Lee K. Y. Using social media images as data in social science research. *New Media & Society*. 2023. Vol. 25 (4). P. 849–871. DOI: <https://doi.org/10.1177/14614448211038761>.
4. Wang L., Song T., Song H.-N., Zhang S. Research on design pattern detection method based on UML model with extended image information and deep learning. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Art. 8718. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12178718>.
5. Christidou V., Bonoti F., Hatzinikita V. Visual images in science education. *Frontiers in Education*. 2023. Vol. 8. Art. 1181754. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1181754>.
6. Kassimi S., Moussa H., Sabiki H. Enhancing image denoising: A novel non-local anisotropic diffusion framework based on Caputo derivatives and Gaussian convolution for the Perona–Malik model. *Signal Processing*. 2024. Vol. 222. Art. 109521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109521>.
7. Lemenkova P. Automation of image processing through ML algorithms of GRASS GIS using embedded Scikit-Learn library of Python. *Examples and Counterexamples*. 2025. Vol. 7. Art. 100180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exco.2025.100180>.
8. Піскозуб Й., Кудряшова А., Оліярник Т. Модель факторів впливу на якість цифрових зображень. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 2. С. 107–111. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-12>.
9. Xie M., Guo H. Self-adaptive alternating direction method of multipliers for image denoising. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14 (22). Art. 10427. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210427>.
10. Zhang J., Chen C., Chen K., Ju M., Zhang D. Local adaptive image filtering based on recursive dilation segmentation. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Art. 5776. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135776>.
11. Schwarz F., Schwarz K. D., Aranda D. A., Bollens K., Shivananjappa N., Creutzburg R., Dimitrova V. Zero-shot social media crisis classification: A training-free multimodal approach. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. Art. 2192. DOI: <https://doi.org/10.3390/app16052192>.
12. Trigka M., Dritsas E. A comprehensive survey of deep learning approaches in image processing. *Sensors*. 2025. Vol. 25. Art. 531. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25020531>.
13. Niu S., Zhang J. Image processing based on convolution neural network. *Electronics*. 2025. Vol. 14. Art. 4649. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14234649>.
14. Wang T.-S., Kim G.-T., Shin J., Jang S.-W. Hierarchical image quality improvement based on illumination, resolution, and noise factors for improving object detection. *Electronics*. 2024. Vol. 13. Art. 4438. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13224438>.
15. Zhu Y., Guo Y., Gao X., Chen Q., Chen Y., Xiang R., Lin B., Wang L., Lu Y., Yan W. Rapid acquisition of high-pixel fluorescence lifetime images of living cells via image reconstruction based on edge-preserving interpolation. *Biosensors*. 2025. Vol. 15. Art. 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios15010043>.
16. Li J., Dou K., Liu J., Li Q., Zhou Y. Research and application of functional model construction method for production equipment operation management and control oriented to diversified and personalized scenarios. *Machines*. 2026. Vol. 14. Art. 368. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines14040368>.

References (transliterated)

1. Reis M. J. C. S. Developments of computer vision and image processing: methodologies and applications. *Future Internet*. 2023, vol. 15, art. 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi15070233>.
2. Hrabovskiy Ye. M., Olenych M. M. Tekhnologichni protsesy vydavnycho-polihrafichnoi spravy : navchalnyi posibnyk [Technological processes of publishing and printing : study guide]. Kharkiv, KhNEU im. S. Kuznetsia [Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics], 2015, 192 p. (In Ukr.).
3. Chen Y., Sherren K., Smit M., Lee K. Y. Using social media images as data in social science research. *New Media & Society*. 2023, vol. 25, no. 4, pp. 849–871. DOI: <https://doi.org/10.1177/14614448211038761>.
4. Wang L., Song T., Song H.-N., Zhang S. Research on design pattern detection method based on UML model with extended image information and deep learning. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, art. 8718. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12178718>.
5. Christidou V., Bonoti F., Hatzinikita V. Visual images in science education. *Frontiers in Education*. 2023, vol. 8, art. 1181754. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1181754>.
6. Kassimi S., Moussa H., Sabiki H. Enhancing image denoising: A novel non-local anisotropic diffusion framework based on Caputo derivatives and Gaussian convolution for the Perona–Malik model. *Signal Processing*. 2024, vol. 222, art. 109521. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2024.109521>.
7. Lemenkova P. Automation of image processing through ML algorithms of GRASS GIS using embedded Scikit-Learn library of Python. *Examples and Counterexamples*. 2025, vol. 7, art. 100180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exco.2025.100180>.
8. Piskozub Y., Kudriashova A., Oliyarnyk T. Model faktoriv vplyvu na yakist tsyfrovyykh zobrazhen [Model of factors influencing the quality of digital images]. *Vymiruvanna ta obchysluvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh* [Measuring and computing devices in technological processes]. 2024, no. 2, pp. 107–111. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-12>. (In Ukr.).
9. Xie M., Guo H. Self-adaptive alternating direction method of multipliers for image denoising. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 22, art. 10427. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210427>.
10. Zhang J., Chen C., Chen K., Ju M., Zhang D. Local adaptive image filtering based on recursive dilation segmentation. *Sensors*. 2023, vol. 23, art. 5776. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23135776>.
11. Schwarz F., Schwarz K. D., Aranda D. A., Bollens K., Shivananjappa N., Creutzburg R., Dimitrova V. Zero-shot social media crisis classification: A training-free multimodal approach. *Applied Sciences*. 2026, vol. 16, art. 2192. DOI: <https://doi.org/10.3390/app16052192>.
12. Trigka M., Dritsas E. A comprehensive survey of deep learning approaches in image processing. *Sensors*. 2025, vol. 25, art. 531. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25020531>.
13. Niu S., Zhang J. Image processing based on convolution neural network. *Electronics*. 2025, vol. 14, art. 4649. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14234649>.
14. Wang T.-S., Kim G.-T., Shin J., Jang S.-W. Hierarchical image quality improvement based on illumination, resolution, and noise factors for improving object detection. *Electronics*. 2024, vol. 13, art. 4438. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13224438>.
15. Zhu Y., Guo Y., Gao X., Chen Q., Chen Y., Xiang R., Lin B., Wang L., Lu Y., Yan W. Rapid acquisition of high-pixel fluorescence lifetime images of living cells via image reconstruction based on edge-preserving interpolation. *Biosensors*. 2025, vol. 15, art. 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios15010043>.
16. Li J., Dou K., Liu J., Li Q., Zhou Y. Research and application of functional model construction method for production equipment operation management and control oriented to diversified and personalized scenarios. *Machines*. 2026, vol. 14, art. 368. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines14040368>.

Надійшла (received) 16.03.2026

Прийнята (accepted) 27.03.2026

Оприлюднена (published) 20.05.2026

UDC 004.94+655

A. V. KUDRIASHOVA, Doctor of Technical Sciences, Docent, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Virtual Reality Systems, Lviv, Ukraine; e-mail: alona.v.kudriashova@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0496-1381>

T. I. OLIYARNYK, Postgraduate, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e mail: taras.i.oliyarnyk@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0873-6674>

Yu. B. SLIPETSKYI, Postgraduate, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e mail: yurii.b.slipetskyi@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6931-6767>

DESIGN OF AN INFORMATION SYSTEM FOR RASTER IMAGE PROCESSING

This paper addresses the problem of designing an information system for automated processing of raster images. The need to improve processing efficiency under conditions of increasing volumes of visual data and stricter quality requirements is substantiated. The main image processing operations are identified, including image import, color correction, noise and defect removal, scaling, and cropping. The limitations of existing software tools, which are mainly oriented toward manual or semi-automatic editing, are described. An approach to the development of the information system based on functional modeling is proposed. The structuring of the image processing workflow is performed using the IDEF0 notation, which enables the formalization of relationships between input data, control parameters, mechanisms, and outputs. A context diagram is constructed and decomposed, resulting in the identification of key subprocesses. Information flows between subprocesses and transition conditions between processing stages are defined. An algorithm describing the system operation is developed in the form of pseudocode, covering the full image processing cycle. The algorithm includes file format and integrity verification, metadata analysis, parameter normalization, iterative quality adjustment, defect detection and correction, as well as scaling and cropping. An early rejection mechanism for invalid data is implemented to reduce computational costs. An adaptive correction loop is proposed to achieve target quality metrics without a fixed number of iterations. Operation logging is incorporated to enable monitoring and traceability of processing results. The practical significance of the proposed system lies in its applicability for automated raster image processing across various domains. Its implementation improves processing efficiency, ensures consistency of quality parameters, and reduces the need for manual intervention. The limitations related to the iterative nature of the algorithm and restricted format support are identified. Directions for future research include the integration of machine learning methods and the extension of system functionality.

Keywords: information system, design, raster image, functional modeling, model, algorithm, decomposition.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Кудряшова Альона Вадимівна / Kudriashova Alona Vadymivna

Автор 2 / Author 2: Оліярник Тарас Ігорович / Oliyarnyk Taras Ihorovych

Автор 3 / Author 3: Сліпєцький Юрій Богданович / Slipetskyi Yurii Bohdanovych

D. K. CHUMACHENKO, PhD Student, Software Engineering Department, Odesa Polytechnic National University, 1 Shevchenka av., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: chumachdk@stud.op.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1477-534X>
V. V. LIUBCHENKO, Doctor of Engineering, Professor in a Software Engineering Department, Odesa Polytechnic National University, 1 Shevchenka av., Odesa, 65044, Ukraine; e-mail: lvv@op.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4611-7832>

RESPONSIBILITY-WEIGHTED AGGREGATION OF QUALITY CRITERIA IN MULTI-LAYER IOT SOFTWARE ARCHITECTURES

Additive quality models are widely used in architectural evaluation because they are transparent, computationally simple, and suitable for integration into ranking and optimization procedures. However, in multi-layer Internet-of-Things systems, directly summing the Edge, Fog, and Cloud contributions introduces a structural bias: the resulting score depends not only on criterion fulfillment but also on the number of layers in which the criterion is realized. This leads to inter-layer double-counting, destroys the unified interpretation scale of criteria, and complicates cross-criterion and cross-scenario comparison. To address this problem, the paper introduces the layer-responsibility matrix W , which distributes the total responsibility for each quality criterion across architectural layers. A corrected aggregation formula is derived as a weighted sum of normalized layer-level contributions under row normalization of W . The paper also provides a lightweight elicitation procedure that allows architects to instantiate W from scenario characteristics, control logic, dominant risks, and computational placement. The basic properties of the proposed formalism are established, including non-negativity, boundedness, invariance with respect to the number of layers, scenario adaptivity, and interpretability. A numerical example demonstrates how the proposed mechanism eliminates inflated criterion values while preserving the linearity of aggregation. A decision-level numerical example further shows that responsibility-weighted aggregation can reverse the ranking of candidate portfolios and thereby change the architectural decision outcome. The approach is further illustrated through two case studies, infrastructure monitoring and control, and bionic prosthesis software, showing that the same aggregation rule remains valid across domains, whereas responsibility distributions vary according to domain logic. The results justify treating W as an independent component of formal decision support for IoT software architecture.

Keywords: IoT software architecture; additive quality model; double-counting; layer-responsibility matrix; Edge-Fog-Cloud; multi-layer systems; quality criteria aggregation.

Introduction. Modern Internet-of-Things systems combine peripheral devices, intermediate processing nodes, and cloud infrastructure. In practical deployments, this translates into multiple execution layers: Edge, Fog, and Cloud, each contributing to the fulfillment of non-functional requirements [1]. Architectural evaluation of such systems often relies on additive models, in which the contributions of individual components, patterns, or layers are summed across selected quality criteria. This focus on quality attributes and their trade-offs in Edge-based IoT systems is also reflected in recent mapping studies [2].

Additive models are attractive due to their transparency and computational simplicity. Additivity enables reproducible comparison of alternatives, explanation of results to stakeholders, and integration into multi-criteria optimization procedures. However, in a multi-layer environment without an explicit semantic alignment mechanism, plain summation ceases to be a neutral mathematical operation: it systematically favors architectures that distribute functions across more layers.

The problem is not the existence of multiple layers per se, but that the same quality criterion may be accounted for by contributions from several layers simultaneously. For example, security in an IoT system is supported by local device-level authentication mechanisms, gateway-level filtering, and centralized access-control policies in the Cloud. Summing these contributions without adjustment increases the integral score for “security” as the number of engaged layers increases, even though the underlying requirement remains the same.

In the authors’ previous work, IoT architecture design was formulated as a multi-objective pattern-portfolio synthesis problem with Pareto optimization [3]. In that

framework, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ denotes a finite catalog of candidate architectural patterns, and $K = \{k_1, \dots, k_m\}$ is the set of non-functional quality criteria. A candidate architecture is represented as a binary portfolio vector x , where $x_j = 1$ if pattern p_j is selected. The contribution matrix $B(N \times M)$ encodes the normalized score $c_{j,k}$ of pattern p_j toward criterion k . The quality of a portfolio is evaluated using an additive objective vector $F(x) = B^T x$, and the solution is a discrete Pareto set of non-dominated portfolios subject to linear feasibility constraints (budget, dependencies, incompatibilities, cardinality). The layer-responsibility matrix introduced in the present paper extends this formalism by distributing each criterion’s total weight across architectural layers, eliminating the inter-layer double-counting that arises when Edge, Fog, and Cloud contributions are summed directly. That line of research provided a decision-support mechanism for generating feasible [4], non-dominated architectural portfolios, but it did not isolate the specific semantic problem that arises when additive criterion contributions are distributed across multiple architectural layers.

The contribution of the present paper is not a new Pareto-synthesis procedure as such, but a formal layer-level reconciliation mechanism for additive quality models in multi-layer IoT systems. Specifically, the paper introduces the layer-responsibility matrix W , proves its basic properties, derives the corrected aggregation formula for criterion contributions across Edge, Fog, and Cloud, and demonstrates on a decision-level example that responsibility-weighted aggregation can alter the ranking of archi-

© Chumachenko D. K., Liubchenko V. V., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



tectural portfolios and lead to a more adequate architectural choice.

Related Work and the Double-Counting Problem.

In conventional criteria-based models of software architecture, the integral score is typically formed as a sum or weighted sum of element contributions for each criterion. This approach is natural when considering independent alternatives or single-layer configurations, but it proves insufficient for Edge-Fog-Cloud systems. The reason is that in a multi-layer environment, the same requirement is realized in a distributed fashion, so the set of contributions possesses not only a quantitative but also a structural dimension.

Consider a criterion k , for instance, security or low latency. If the evaluation of architecture S is performed separately for each layer and then summed without reconciliation, the maximum aggregated score of k begins to depend not only on the quality of the solution but also on the number of layers in which k is represented. In effect, the criterion loses its fixed scale: for one scenario, it varies within $[0, 1]$, while for another it may range up to $[0, /L/]$, where $/L/$ is the number of layers.

In the broader literature on software architecture evaluation, direct methodological predecessors of the present work include architecture trade-off analysis and multi-criteria decision making. In particular, the CBAM line of work [5] treats architectural decisions through cost-benefit reasoning over quality attributes, while AHP-based approaches [6] formalize the derivation of criterion priorities and rankings of design alternatives from expert judgments. In the IoT domain, trade-off-aware architectural tactics [7] have recently been proposed to analyze security decisions alongside their impact on other quality attributes, rather than in isolation. From the MCDM perspective, studies of weighted-average normalization [8] further show that additive aggregation requires an explicit normalization step in order to transform heterogeneous criterion values into a comparable scale.

However, these approaches address an adjacent rather than an identical problem. They explain how to analyze trade-offs between criteria, how to derive weights, and how to normalize heterogeneous criterion values before aggregation, but they do not address the specific situation of multi-layer IoT systems in which one and the same quality criterion is partially realized at Edge, Fog, and Cloud simultaneously. In such cases, even normalized layer-level contributions may still inflate the integral score if they are added without first distributing the total responsibility for that criterion across layers. Optimization-oriented studies address search, refactoring, portfolio generation, and application placement in Fog/Edge infrastructures [9, 10], yet they also typically assume a fixed criterion scale and do not isolate the layer-induced inflation effect.

The closest structural analog to the proposed matrix W is the weight vector derived from AHP-based methods [6], in which pairwise comparisons among criteria yield a normalized priority distribution that sums to one. However, AHP operates across criteria, distributing importance among quality attributes for a fixed, single-layer alternative. It does not address the situation in which one

criterion is realized simultaneously across multiple architectural layers: when the AHP weight for “security” equals 0.3, this scalar governs only how security competes against other criteria in the final ranking, not how the security contribution of the Edge layer relates to that of the Cloud. Consequently, applying AHP weights to a multi-layer IoT system without prior inter-layer reconciliation does not prevent the inflation of integral scores; it only rescales an already-inflated sum.

A similar limitation applies to QoS-aware aggregation approaches widely used in Edge-Fog-Cloud placement and service composition research [7, 11]. These approaches normalize individual quality of service (QoS) attributes before aggregating them via weighted sums or composite fitness functions, which correctly handle heterogeneous units across attributes. Yet normalization across attributes and normalization across layers are orthogonal operations: even fully normalized layer-level contributions still inflate the integral criterion score when summed without distributing the criterion's total “mass” among layers. The specific gap that W closes is therefore not addressed by criterion-weight derivation (AHP), trade-off identification (ATAM/CBAM [5]), or QoS normalization: none of these mechanisms distributes the unit responsibility for a single criterion across the architectural layers in which it is concurrently realized.

In this paper, double-counting is defined as the situation where a single quality criterion acquires an artificially inflated integral value because normalized Edge, Fog, and Cloud contributions are added without a prior distribution of the criterion's total “mass” among layers. This effect distorts the comparison of alternatives, complicates cross-scenario comparability, and weakens the interpretability of integral scores.

The Layer-Responsibility Matrix W . Let $L = \{\text{Edge, Fog, Cloud}\}$ be the set of architectural layers of an IoT system, K the set of quality criteria, P the catalog of architectural patterns, and $S \subseteq P \times L$ an architectural portfolio consisting of pattern layer pairs. The scenario context is denoted C . For each criterion $k \in K$ and layer $l \in L$, let $c_l(k, S; C) \in [0, 1]$ denote the normalized layer-level contribution, representing the total contribution of all patterns in S deployed at layer l toward criterion k as $(p, l) \in S$.

Without inter-layer reconciliation, the criterion can be scored by naive summation as

$$q_k^\Sigma(S, C) = \sum_{l \in L} c_l(k, S; C). \quad (1)$$

Formula (1) is the source of double-counting and, in what follows, is treated as the baseline uncorrected layer-wise additive aggregation. With three layers, q_k^Σ can reach 3 even though each c_j is normalized to $[0, 1]$ and semantically represents the degree of fulfillment of a single criterion.

To eliminate this effect, we introduce the layer-responsibility matrix $W = [w_{kl}]$. The element $w_{kl} \in [0, 1]$

indicates the share of the total responsibility for criterion k that falls on layer l in scenario C . The key requirement is row normalization as

$$\sum_{l \in L} w_{kl} = 1, \forall k \in K. \quad (2)$$

Formula (2) means that criterion k is treated as a single unit of responsibility, not multiplied when a multi-layer architecture is adopted, but distributed among Edge, Fog, and Cloud. Consequently, adding a new layer to the configuration does not automatically inflate the criterion's integral weight; it only changes the structure of its realization.

Based on \mathbf{W} , the corrected aggregated contribution of criterion k is defined as

$$q_k^W(S, C) = \sum_{l \in L} w_{kl} c_l(k, S; C). \quad (3)$$

Formula (3) is the central result of this paper. It ensures scenario-dependent yet mathematically consistent computation of criterion scores across layers. For practical use, the matrix \mathbf{W} must be elicited from the scenario rather than assigned arbitrarily. The matrix \mathbf{W} is instantiated for a given scenario C by a lightweight expert procedure. For each criterion k , the architect first identifies the layer at which the criterion is primarily realized, using three practical questions: where the critical control or response loop is closed, where the main computational or storage burden related to the criterion is located, and where the dominant risk of criterion degradation arises. The dominant layer is assigned the largest share of responsibility, while the remaining share is distributed between the supporting layers according to their secondary contribution. If the criterion is inherently distributed, the responsibility may be allocated more evenly. In all cases, the resulting row is normalized so that

$$\sum_{l \in L} w_{kl} = 1.$$

As practical heuristics, low latency and real-time reaction typically shift responsibility toward Edge, scalability and global coordination toward Cloud, reliability under unstable connectivity toward Fog or Edge-Fog combinations, whereas security is often distributed across all three layers.

Properties of \mathbf{W} . Property 1. Non-negativity and normalization. Since $w_{kl} \in [0, 1]$ and $\sum_{l \in L} w_{kl} = 1$, the matrix \mathbf{W} defines a valid responsibility distribution without negative or redundant coefficients.

Property 2. Score boundedness. If $c_l(k, S; C) \in [0, 1]$, then $q_k^W(S, C) \in [0, 1]$. Indeed, q_k^W is a convex combination of values in $[0, 1]$ and therefore cannot exceed the interval.

Property 3. Invariance with respect to the number of layers. If the semantic content of criterion k remains the same, increasing the number of layers does not automatically increase q_k^W , because the total weight of the criterion remains fixed at 1.

Property 4. Scenario adaptivity. Matrix \mathbf{W} is not a universal constant. Its values depend on scenario C , the system type, physical constraints, data-processing topology, and dominant risks. The same non-functional requirement may be distributed among layers in fundamentally different ways across different IoT domains.

Property 5. Interpretability. Each coefficient w_{kl} has a natural interpretation: it reflects the degree to which a specific layer contributes to achieving a criterion. This makes \mathbf{W} suitable not only for computation but also for expert discussion and validation.

Numerical Example. To demonstrate that the proposed aggregation mechanism affects not only the magnitude of scores but also the ranking of architectural alternatives, consider a simplified IoT scenario: smart-building climate control with three quality criteria ($K = \{\text{low latency, reliability, energy efficiency}\}$) and the standard three-layer decomposition $L = \{\text{Edge, Fog, Cloud}\}$. Two candidate portfolios are compared:

- Portfolio A (“cloud-centric”): comprises patterns with strong Cloud-side presence (e.g., API Gateway, Cloud Load Balancer, Remote Monitoring), yielding moderate-to-high contributions at every layer;
- Portfolio B (“edge-concentrated”): comprises patterns focused on the local control loop (e.g., Local Caching, Sense-Compute-Control, Watchdog Timer), yielding high Edge contributions but weak Cloud scores.

The layer-responsibility matrix \mathbf{W} for this scenario (Table 1) is constructed according to the elicitation procedure described in Section 3. In a climate-control system, the sensor-actuator loop is closed at the Edge, so low latency and energy efficiency are Edge-dominated. Reliability depends primarily on local aggregation and failover mechanisms at the Fog gateway, with Cloud providing a secondary backup role.

Table 1 – Layer-responsibility matrix \mathbf{W} for the smart-building climate-control example.

Criterion	Edge	Fog	Cloud
Low latency	0.60	0.25	0.15
Reliability	0.25	0.45	0.30
Energy efficiency	0.55	0.30	0.15

Table 2 presents the layer-level contributions c_j for both portfolios, together with the naive aggregation q_k^Σ (formula 1) and the corrected aggregation q_k^W (formula 3).

Under naive aggregation, Portfolio A dominates on every criterion ($1.80 > 1.60$, $1.90 > 1.70$, $1.65 > 1.55$) and achieves a higher total score (5.35 vs. 4.85). An architect relying on this ranking would select A. However, A's advantage is an artifact of inter-layer double-counting: its uniformly moderate contributions are amplified by summation across all three layers, particularly by the Cloud scores (0.70, 0.75, 0.65) that contribute to criteria for which Cloud bears only minor responsibility.

Table 2 – Comparison of two portfolios under naive and corrected aggregation

Criterion	c_E	c_F	c_C	q_k^Σ	q_k^W
Portfolio A					
Low latency	0.50	0.60	0.70	1.80	0.56
Reliability	0.55	0.60	0.75	1.90	0.63
Energy efficiency	0.45	0.55	0.65	1.65	0.51
Sum	–	–	–	5.35	1.70
Portfolio B					
Low latency	0.85	0.55	0.20	1.60	0.68
Reliability	0.50	0.80	0.40	1.70	0.61
Energy efficiency	0.80	0.60	0.15	1.55	0.64
Sum	–	–	–	4.85	1.93

After applying W , the ranking reverses. Portfolio B outperforms A on two of the three criteria – low latency (0.677 vs. 0.555) and energy efficiency (0.643 vs. 0.510) – and yields a higher aggregate corrected score (1.925 vs. 1.698). Portfolio A retains an advantage only on reliability (0.633 vs. 0.605), where its stronger Cloud contribution (0.75 vs. 0.40) aligns with the non-negligible Cloud share of responsibility ($w_{\text{reliability, Cloud}} = 0.30$).

The reversal is not a numerical coincidence but a direct consequence of the domain logic encoded in W . In a climate-control system, real-time response and energy management are determined primarily at the Edge, where the physical control loop operates. Portfolio B concentrates its architectural strength precisely at this layer ($c_E = 0.85$ for latency, 0.80 for energy), which is recognized by W through dominant Edge weights (0.60 and 0.55, respectively). Portfolio A distributes effort more evenly but fails to prioritize the layer that matters most – a weakness masked by naive summation but exposed by the corrected formula. Thus, the example demonstrates that W does not merely rescale scores but can also change the outcome of architectural decisions, favoring the portfolio whose structural emphasis aligns with the actual distribution of responsibilities in the target domain.

Case Study. The proposed method is examined under realistic application conditions through two case studies that represent different classes of IoT systems. The purpose of the analysis is not to repeat the computational search procedure itself, but to show how the layer-responsibility matrix W changes the interpretation of the obtained architectural result. For each scenario, a previously derived compromise portfolio from multi-objective synthesis is taken as the architectural outcome, after which the scenario-specific matrix W is constructed and the corrected aggregation is compared with the baseline layer-wise summation. This makes it possible to evaluate whether the proposed mechanism preserves a unified criterion scale and reflects the actual distribution of architectural responsibility across Edge, Fog and Cloud.

Infrastructure Monitoring and Control. The experimental outcome considered in this scenario is the previously obtained compromise architectural portfolio for the infrastructure monitoring and control problem. This portfolio comprises API Gateway, OAuth2, TLS, Circuit

Breaker, Health Checks, Message Broker, and Publish–Subscribe, and is treated here as the architectural result to be analyzed through the proposed W -based aggregation mechanism. The computational search procedure that produced this portfolio is reported in the authors’ earlier work, where a pool of 16 architectural patterns was evaluated against five quality criteria, yielding 19448 candidate portfolios, 2010 feasible ones, and 510 Pareto-optimal alternatives. In the present paper, these search results are not recomputed; instead, the focus is placed on the scenario-specific construction of W and on the comparison between corrected aggregation and the baseline layer-wise summation for the obtained portfolio.

The domain logic of this scenario determines the scenario-specific W matrix (Table 3). For the “low latency” criterion, the greatest responsibility lies with the Edge layer, because latency is formed before data reaches the Cloud. For “scalability”, the dominant share shifts to Cloud, where elastic resource allocation and horizontal scaling are realized.

Table 3 – Layer-responsibility matrix W for infrastructure monitoring

Criterion	Edge	Fog	Cloud
Security	0.20	0.35	0.45
Reliability	0.25	0.40	0.35
Low latency	0.65	0.25	0.10
Scalability	0.10	0.30	0.60
Complexity	0.30	0.40	0.30

Table 4 presents the layer-level contributions, cl , for the compromise portfolio of Scenario 1, along with both aggregation schemes. The layer-level contributions were derived from the pattern contribution profiles used in the computational experiment: for each layer, the contributions of all patterns assigned to that layer were summed and saturated to $[0, 1]$.

Without W , all criteria exceed 1 (ranging from 1.55 to 2.10), rendering them mutually incomparable on a single scale. After applying W , scores return to $[0, 1]$ and acquire meaningful interpretation. For “low latency,” the corrected value of 0.710 is high precisely because the largest layer-level contribution is observed at Edge, and W assigns this

Table 4 – Aggregated scores for the compromise portfolio of Scenario 1

Criterion	c_E	c_F	c_C	No W	With W	Interpretation
Security	0.50	0.70	0.80	2.00	0.705	Inflated without W across 3 layers
Reliability	0.60	0.80	0.70	2.10	0.715	Balanced Fog-Cloud responsibility
Low latency	0.85	0.55	0.20	1.60	0.710	Edge-dominated criterion
Scalability	0.20	0.45	0.90	1.55	0.695	Cloud-dominated criterion
Complexity	0.35	0.75	0.60	1.70	0.585	Center of gravity at Fog

layer the dominant responsibility share (0.65). For “scalability”, the value 0.695 is driven primarily by the strong Cloud contribution, which is also consistent with the scenario logic.

Bionic Prosthesis Software. The experimental outcome considered in this scenario is the previously obtained compromise architectural portfolio for bionic prosthesis software. This portfolio comprises Graceful Degradation, Health Checks, Local Caching, Sense-Compute-Control, TLS, Token Auth, and Watchdog Timer, and is treated here as the architectural result to be analyzed through the proposed W -based aggregation mechanism. The computational search procedure that produced this portfolio is reported in the authors’ earlier work, where a pool of 16 architectural patterns was evaluated against five quality criteria, yielding 23816 candidate portfolios, 3690 feasible ones, and 144 Pareto-optimal alternatives. In the present paper, these search results are not recomputed; instead, the focus is placed on the scenario-specific construction of W and on the comparison between corrected aggregation and the baseline layer-wise summation for the obtained portfolio.

The domain logic of a prosthesis shifts the center of responsibility sharply toward Edge (Table 5). Patient safety and energy efficiency both have over 50 % of their weight at Edge, reflecting the fact that bodily interaction and local control cannot be delegated to remote layers without unacceptable risk or latency. The matrices in Tables 3 and 5 were constructed according to the elicitation procedure described in Section 3.

Table 5 – Layer-responsibility matrix W for bionic prosthesis software

Criterion	Edge	Fog	Cloud
Patient safety	0.55	0.30	0.15
Latency	0.70	0.20	0.10
Reliability	0.40	0.35	0.25
Energy efficiency	0.75	0.20	0.05
Data security	0.35	0.25	0.40

Table 6 presents the layer-level contributions, cl , for the compromise portfolio of Scenario 2, along with both aggregation schemes. The layer-level contributions were derived from the pattern contribution profiles used in the computational experiment: for each layer, the contributions of all patterns assigned to that layer were summed and saturated to $[0, 1]$.

Comparing Tables 4 and 6 reveals that W is not merely a scale corrector but a scenario-dependent model of

architectural responsibility. For the prosthesis, the criteria “patient safety”, “latency”, and “energy efficiency” receive high corrected scores precisely because their strongest layer-level contributions are observed at Edge, and W assigns Edge the dominant share. For “data security”, the center of responsibility shifts to Cloud, reflecting centralized logging, access policies, and remote-update governance. The two W matrices are structurally different, yet the aggregation formula remains the same, confirming the domain-independence of formalism and the domain-specificity of its parametrization.

Discussion. The results lead to several generalizations. First, matrix W resolves a structural, not cosmetic, problem of additive models in multi-layer systems by correcting the baseline aggregation that otherwise conflates criterion fulfillment with the number of participating layers. Without it, the model conflates two distinct meanings: the degree of criterion fulfillment and the number of layers through which the criterion is realized. As a consequence, architectures with more distributed execution may automatically receive a higher integral score even if the actual quality of the solution is not superior.

Second, W preserves the simplicity of the additive model. Unlike non-linear or quadratic interaction models, it does not require a transition to a different class of computational methods. Aggregation remains linear, so the approach can be directly integrated into ranking schemes, multi-criteria portfolio synthesis models, and Pareto-set construction procedures [1, 12].

Third, W makes explicit the domain knowledge that often exists only implicitly in many methodologies. An architect typically understands that low latency for a prosthesis is primarily determined by the peripheral control loop, while the scalability of an analytics platform depends mainly on the Cloud. However, without a formal projection of this understanding into the model, it does not influence computation in a controlled and reproducible manner.

Fourth, the proposed approach is compatible with the broader formal apparatus developed in the authors’ earlier work [1]. In that framework, W combines with the representation of architecture as a portfolio $S \subseteq P \times L$, with contribution functions $c(k, p, l; C)$, with the coverage relation $R(C)$, and with multi-criteria synthesis and compromise-selection procedures. This means that W is not an isolated local idea but an organic part of a unified decision-support model.

Finally, it is important to delineate the scope of applicability. Matrix W eliminates specifically inter-layer double-counting. If within a single layer several patterns

duplicate the same mechanism or exhibit strong synergistic/conflicting effects, W alone is insufficient. In such cases, compatibility constraints, pattern grouping, or a separate interaction-modeling layer are needed. Thus, W does not replace a full pattern-interaction model but substantially improves the baseline additive model, from which the problem originates.

The case studies show that W should be interpreted not merely as a normalization device, but as a scenario-dependent model of architectural responsibility. For both infrastructure monitoring and bionic prosthesis software, the same aggregation rule remained valid, whereas the responsibility matrices differed according to domain logic. This indicates that the proposed formalism is domain-

Table 6 – Aggregated scores for the compromise portfolio of Scenario 2

Criterion	c_E	c_F	c_C	No W	With W	Interpretation
Patient safety	0.90	0.70	0.30	1.90	0.750	Critical local responsibility
Latency	0.88	0.50	0.25	1.63	0.741	Latency set at Edge
Reliability	0.72	0.78	0.60	2.10	0.711	Balanced across three layers
Energy efficiency	0.86	0.45	0.20	1.51	0.745	Local control loop dominates
Data security	0.40	0.55	0.80	1.75	0.598	Significant Cloud role

Limitations and Future Work. The proposed approach still has several limitations. First, although Section 3 provides a minimal elicitation procedure for constructing the matrix W , its parametrization remains partly dependent on expert judgment and scenario interpretation. Different architects may assign slightly different responsibility shares even when considering the same system context. Future work should therefore investigate automated or semi-automated derivation of W from empirical data, such as telemetry, latency logs, energy-consumption profiles, or load-test results.

Second, W does not model interactions within-layer patterns. If two security tactics duplicate each other or, conversely, amplify each other's effect, this is not reflected directly in formula (3). For such cases, the model needs to be extended, or separate interaction coefficients introduced.

Third, the paper uses scenario illustrations for two domains but does not attempt to build a universal catalog of W matrices for all classes of IoT systems. Such a catalog could become a separate research direction and a practical artifact for architects [13].

Fourth, a potentially fruitful direction is to combine W with a posteriori selection procedure, in particular, with Pareto-alternative ranking via TOPSIS-like approaches or scenario-based risk analysis [9, 12]. In this case, W would serve as a mechanism for constructing the correct criterion prior to the final compromise selection stage.

Conclusions. The study has shown that additive quality models for multi-layer IoT systems contain a structural source of bias: when Edge, Fog, and Cloud contributions are summed directly, the resulting score depends not only on criterion fulfillment, but also on the number of layers in which the criterion is realized. As a result, naive aggregation loses a unified interpretation scale, making cross-criterion comparisons unreliable.

Results demonstrate that the layer-responsibility matrix W resolves this problem by separating two notions that are otherwise conflated in baseline additive models: the degree of criterion fulfillment and the structural distribution of its realization across layers. In this way, the corrected aggregation preserves boundedness and comparability of scores while retaining the simplicity and linearity of the additive model.

independent at the level of computation, yet domain-sensitive at the level of parametrization.

Consequently, W should be regarded not as an auxiliary correction device but as a first-class element of the architectural decision model, standing alongside the portfolio representation, the contribution functions, and the Pareto-synthesis procedure.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used Claude (Anthropic) for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

- Alfonso I., Garcés K., Castro H., Cabot J. Self-adaptive architectures in IoT systems: a systematic literature review. *Journal of Internet Services and Applications*. 2021, vol. 12, article 14. DOI: 10.1186/s13174-021-00145-8.
- Ashouri M., Davidsson P., Spalazzese R. Quality attributes in edge computing for the Internet of Things: A systematic mapping study. *Internet of Things*. 2021, vol. 13, article 100346. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100346.
- Chumachenko D., Liubchenko V. A multi-objective optimization model for designing the software architecture of Internet of Things systems. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2026, vol. 363, no. 2, pp. 103–109. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-13.
- Jafari V., Rezvani M. H. Joint optimization of energy consumption and time delay in IoT-fog-cloud computing environments using NSGA-II metaheuristic algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2023, vol. 14, pp. 1675–1698. DOI: 10.1007/s12652-021-03388-2.
- Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice*. 2nd ed. Addison-Wesley Longman, 2003. 464 p.
- Zhu L., Aurum A., Gorton I., Jeffery R. Tradeoff and Sensitivity Analysis in Software Architecture Evaluation Using Analytic Hierarchy Process. *Software Quality Journal*. 2005, vol. 13, pp. 357–375. DOI: 10.1007/s11219-005-4251-0.
- Orellana C., Cereceda-Balic F., Solar M., Astudillo H. Enabling Design of Secure IoT Systems with Trade-Off-Aware Architectural Tactics. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 22. Art. 7314. DOI: 10.3390/s24227314.
- Vafaei N., Ribeiro R. A., Camarinha-Matos L. M. Selection of Normalization Technique for Weighted Average Multi-criteria Decision Making. *Camarinha-Matos L., Adu-Kankam K., Julashokri M., eds. Technological Innovation for Resilient Systems. DoCEIS 2018. IFIP Advances in Information and Communication*

- Technology*. Vol. 521. Springer, Cham, 2018, pp. 43–52. DOI: 10.1007/978-3-319-78574-5_4.
9. Di Pompeo D., Tucci M. Multi-objective Software Architecture Refactoring driven by Quality Attributes. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*. 2023, pp. 175–178. DOI: 10.1109/ICSA-C57050.2023.00046.
 10. Smolka S., Mann Z. Á. Evaluation of fog application placement algorithms: a survey. *Computing*. 2022, vol. 104, pp. 1397–1423. DOI: 10.1007/s00607-021-01031-8.
 11. Tran M.-Q. et al. Energy Efficient Node Selection in Edge-Fog-Cloud Layered IoT Architecture. *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 13, art. 6039. doi: 10.3390/s23136039
 12. Lust T., Teghem J. The multiobjective multidimensional knapsack problem: A survey and a new approach. *International Transactions in Operational Research*. 2012, vol. 19, no. 4, pp. 495–520. DOI: 10.1111/j.1475-3995.2011.00840.x.
 13. Oprea S. V., Băra A. An Edge-Fog-Cloud computing architecture for IoT and smart metering data. *Peer-to-Peer Networking and Applications*. 2023, vol. 16, pp. 818–845. DOI: 10.1007/s12083-022-01436-y.

Received 11.03.2026

Accepted 07.04.2026

Published 20.05.2026

УДК 004.41 + 004.738.5 + 519.816

Д. К. ЧУМАЧЕНКО, аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: chumachdk@stud.op.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1477-534X>

В. В. ЛЮБЧЕНКО, доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044; e-mail: lvv@op.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4611-7832>

АГРЕГУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ В БАГАТОШАРОВИХ ПРОГРАМНИХ АРХІТЕКТУРАХ ІОТ З УРАХУВАННЯМ ВАГ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

У статті розглянуто проблему подвійного врахування критеріїв якості в багатошарових програмних архітектурах Інтернету речей, де один і той самий нефункціональний критерій одночасно реалізується на рівнях Edge, Fog і Cloud. Показано, що традиційне адитивне підсумовування внесків окремих шарів породжує структурне викривлення оцінювання: інтегральне значення критерію починає залежати не лише від реального ступеня його досягнення, а й від кількості шарів, у яких цей критерій представлено. Це призводить до втрати єдиної інтерпретаційної шкали, ускладнює міжкритеріальне порівняння та може змішувати архітектурний вибір на користь рішень, у яких ефект розподілено між більшою кількістю шарів. Для усунення цього недоліку запропоновано матрицю ваг відповідальності шарів, яка задає розподіл сумарної відповідальності за кожен критерій якості між архітектурними рівнями та використовується в процедурі зваженого агрегування. Виведено скориговану формулу агрегування, встановлено основні властивості запропонованого формалізму, зокрема невід'ємність, обмеженість, інваріантність щодо кількості шарів, сценарну адаптивність та інтерпретованість. Додатково подано мінімальну експертну процедуру формування матриці ваг на основі особливостей сценарію, контурів керування, локалізації обчислювального навантаження та домінуючих ризиків. На числовому прикладі показано, що запропонований підхід не лише усуває інфляцію оцінок, а й здатний змінювати ранжування архітектурних альтернатив, тобто впливати на підсумковий вибір портфеля патернів. Практичну придатність підходу продемонстровано на двох сценаріях – системі моніторингу та керування інфраструктурою й програмному забезпеченні біонічного протеза. Отримані результати підтверджують, що зважене агрегування за відповідальністю шарів забезпечує більш коректне та змістовно узгоджене оцінювання багатошарових IoT-архітектур і може розглядатися як окремий компонент формального апарату підтримки архітектурних рішень.

Ключові слова: програмна архітектура IoT; багатошарові архітектури; критерії якості; адитивне агрегування; подвійне врахування; матриця ваг відповідальності; Edge-Fog-Cloud; підтримка архітектурних рішень.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чумаченко Данило Кирилович / Chumachenko Danylo Kyrylovych

Автор 2 / Author 2: Любченко Віра Вікторівна / Liubchenko Vira Viktorivna

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.10
УДК 004.8:004.9

С. Ф. ЧАЛИЙ, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; e mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

Р. В. КРАВЧЕНКО, аспірант кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e mail: rostyslav.kravchenko1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0324-3597>

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕМПОРАЛЬНО УПОРЯДКОВАНИХ ВХІДНИХ ДАНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Предметом статті є процес формування пояснень щодо рішень інтелектуальних систем, вхідні дані яких є темпорально упорядкованими послідовностями подій із часовими затримками. Метою роботи є розробка підходу до побудови пояснень щодо рішень інтелектуальних систем із темпорально упорядкованими вхідними даними, що враховує часові затримки у вхідних послідовностях подій. Для досягнення мети вирішуються наступні задачі: розробка методу обробки темпоральних затримок, що включає компонент оцінювання затримок на основі кореляційної функції та компонент кодування часу; розробка інформаційної технології побудови пояснень щодо рішень інтелектуальної системи на основі темпорального порядку вхідних даних, що включає розроблений метод у єдиний pipeline побудови та верифікації пояснень; виконання експериментальної перевірки методу та інформаційної технології. Запропоновано метод обробки темпоральних затримок у каузальних залежностях між вузлами динамічного графа темпоральної графової нейронної мережі, що відрізняється від відомих підходів поєднанням компонентів кореляційного оцінювання оптимального темпорального зміщення, кодування часу з фазовим зсувом та адаптивного об'єднання отриманих представлень, що забезпечує врахування каузальних залежностей у поясненнях на основі оцінювання часових затримок. Запропоновано інформаційну технологію побудови пояснень щодо рішень інтелектуальної системи на основі темпорального порядку вхідних даних, що включає етапи адаптивного формування темпоральних графів подій, побудову темпоральної графової нейронної мережі з обробкою темпоральної затримки, генерацію та подальшу верифікацію пояснень на основі темпоральної алгебри, що забезпечує формування пояснень з урахуванням змін у порядку вхідних подій інтелектуальної системи. Виконана експериментальна перевірка підтвердила, що метод обробки темпоральної затримки забезпечує адаптацію до детермінованої, стохастичної і циклічної затримки.

Ключові слова: пояснюваний штучний інтелект; темпоральна затримка; темпоральні залежності, каузальні залежності, темпоральна графова нейронна мережа; інформаційна технологія.

Вступ. Проблема інтерпретованості рішень інтелектуальних систем (ІС) пов'язана з тим, що сучасні ІС використовують глибокі нейронні мережі для формування релевантних рішень, проте не надають користувачеві зрозумілого обґрунтування щодо причин отриманих результатів. Така непрозорість моделей, що забезпечують прийняття рішень в інтелектуальних системах, є одним із ключових бар'єрів, що знижують довіру користувачів та зменшують можливості практичного застосування ІС у галузях, де ці рішення впливають на здоров'я та безпеку людей [1, 2]. Для вирішення цієї проблеми проводяться дослідження за напрямом пояснюваного штучного інтелекту (XAI, Explainable AI). В рамках даного напрямку виконується розробка методів, що забезпечують зрозумілість і доступність пояснень для кінцевого користувача ІС [3].

Розробка методів XAI ускладнюється у випадках, коли інтелектуальна система використовує темпорально упорядковані вхідні дані. Ці дані відображають послідовності подій, між якими існують часові затримки. Наявність затримок може порушити припущення про послідовність причини та наслідку і тому обмежує застосування традиційних методів побудови пояснень [4]. Проте такі ситуації є типовими при вирішенні задач аналізу транзакцій, моніторингу роботи промислового обладнання, медичних процесів [5]. Традиційні методи пояснювального штучного інтелекту орієнтовані на аналіз статичних даних і зазвичай не враховують темпоральних затримок у причинно-наслідкових залежностях, що може привести

до неточного встановлення причин та наслідків і формування некоректних пояснень у каузальному аспекті.

Для побудови пояснень на основі обробки динамічних графових структур у сучасних ІС використовуються темпоральні графові нейронні мережі (TGNN), зокрема з архітектурами TGAT [6] і TGN [7]. Вказані архітектури забезпечують можливість побудови пояснень для ІС, що обробляють вхідні послідовності подій, тому що такі мережі можуть явно моделювати зміни зв'язків між об'єктами у часі. Проте механізми уваги у загальних TGNN обробляють темпоральні залежності з однаковими параметрами згасання для зменшення впливу старих подій і, відповідно, не розрізняють послідовності довготривалих подій з важливими наслідками та коротких подій без суттєвих наслідків [8].

Комплексний підхід до побудови пояснень передбачає формалізацію темпоральних залежностей [9, 10], адаптивний вибір інтервалів часу для формування цих залежностей, використання адаптованого механізму уваги та побудову темпорально узгоджених пояснень із верифікацією на основі темпоральних характеристик даних [11, 12]. Проте для реалізації даного комплексного підходу потрібно виконати оцінку часових затримок між подіями, пов'язаних відношеннями «причина-наслідок» безпосередньо в архітектурі TGNN, що дає можливість формувати пояснення з використанням змін у інформації про темпоральний порядок вхідних даних. Така інтеграція дає можливість побудувати на-

© Чалий С. Ф., Кравченко Р. В., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



скрізний процес побудови пояснень. Зазначене свідчить про актуальність теми дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Методи пояснюваного штучного інтелекту для систем із темпоральними залежностями включають як post-hoc аналіз статичних рішень, так і інтерпретацію динамічних послідовностей, проте зазвичай не враховують явних темпоральних затримок між причинами та наслідками. У дослідженні [1] класифікуються підходи до ХАІ за типом моделі та видом пояснення. Зазначено, що більшість post-hoc методів не можуть бути застосовані для динамічних систем із темпоральним упорядкуванням. У дослідженні [2] проведено порівняльний аналіз методів побудови пояснень. Результати аналізу свідчать, що підходам для виявлення каузальних залежностей для темпорально упорядкованих даних не приділяється достатньо уваги.

У роботі [3] запропоновано підхід до виявлення значущих підграфів для пояснення рішень GNN, однак ця архітектура орієнтована на статичні графи і не враховує темпоральної структури вхідних даних. Дослідження [4] розглядає інтегрування градієнтів для визначення вкладу кожної ознаки у результат нейронної мережі. Даний підхід може бути застосований до часових рядів, проте він не враховує структурних залежностей між вузлами та часові затримки між причиною і наслідком. Аналогічне обмеження характерне для методу LIME [5], який генерує локальні лінійні апроксимації рішень інтелектуальної системи без урахування темпоральної структури вхідних даних.

У [6] запропоновано механізм темпорального кодування на основі перетворення Фур'є, що використовується для динамічних графів. Робота [7] базується на концепції потоку подій, коли зміни в графовій мережі відбуваються лише в моменти виникнення подій. У [8] запропоновано адаптацію параметрів GNN за допомогою рекурентних мереж. Проте жодна з перелічених архітектур не моделює явно часові затримки між вузлами, пов'язаними причинно-наслідковими залежностями.

Дослідження [9, 10], що присвячено верифікації відповідності темпоральних правил у процесно-орієнтованих системах, показує, що неврахування темпоральних зміщень між вхідними подіями приводить до помилок при аналізі причинно-наслідкових ланцюжків.

Вирішення задачі оцінювання часових затримок виконується з використанням методів крос-кореляції та аналізу Фур'є в обробці часових рядів [11], проте вони не адаптовані для використання в якості окремих складових у архітектурі TGNN. У роботі [12] запропоновано темпоральних зсув між елементами вхідної послідовності при вирішенні задач підтримки роботи рекомендаційних систем. Проте запропонований метод орієнтований на прогнозування, а не на генерацію пояснень.

Таким чином, задача комплексної обробки часових затримок між причиною та наслідком в рамках графових нейронних мереж потребує свого вирішення для побудови інформаційної технології побудови пояснень на основі аналізу темпорально упорядкованих вхідних даних.

Мета та задачі дослідження.

Метою роботи є розробка підходу до побудови пояснень щодо рішень інтелектуальних систем із темпорально упорядкованими вхідними даними, що враховує часові затримки у вхідних послідовностях подій.

Для досягнення поставленої мети дослідження вирішуються задачі:

- розробка методу обробки темпоральних затримок, що включає компонент оцінювання затримок на основі крос-кореляційної функції та компонент кодування часу;

- розробка інформаційної технології побудови пояснень щодо рішень інтелектуальної системи на основі темпорального порядку вхідних даних, що включає розроблений метод у єдиний процес побудови та верифікації пояснень;

- виконання експериментальної перевірки методу та інформаційної технології.

Метод обробки темпоральних затримок для каузальних залежностей між вузлами динамічного графа темпоральної графової нейронної мережі.

Темпоральна затримка визначається як часовий інтервал τ між подією-причиною e_{beg} і подією-наслідком e_{end} , для яких виконується каузальна залежність

$$e_{\text{beg}} \rightarrow e_{\text{end}}.$$

Метод включає наступні три етапи.

Етап 1. Розрахунок оптимальної часової затримки між вузлами графу.

Оптимальною вважається така затримка $\tau_{\text{beg, end}}^*$, за якої активність вузла-причини beg найкраще передбачає активність вузла-наслідку end у темпоральному графі, тобто між їхніми прихованими станами досягається максимальна нормована крос-кореляція. Для кожної пари вузлів (beg , end) темпорального графа це зміщення визначається як:

$$\tau_{\text{beg, end}}^* = \arg \max_{\tau} \frac{\sum_t h_{\text{beg}}(t) \cdot h_{\text{end}}(t + \tau)}{\sqrt{\sum_t h_{\text{beg}}^2(t) \cdot \sum_t h_{\text{end}}^2(t)}}, \quad (1)$$

де $h_{\text{beg}}(t)$, $h_{\text{end}}(t)$ – вектори прихованих станів пари вузлів (beg , end) у момент часу t .

Обчислення здійснюється через перетворення Фур'є, що забезпечує зниження складності до $O(N \log N)$. Знайдене значення $\tau_{\text{beg, end}}^*$ відображає часовий інтервал, через який вплив події у вузлі beg проявляється у вузлі end .

Етап 2. Формування ваг уваги з урахуванням темпорального зсуву.

На даному етапі знайдена оцінка $\tau_{\text{beg, end}}^*$ використовується для уточнення ваги стандартного механізму уваги. Уточнення відбувається так, щоб максимальну вагу отримували саме ті зв'язки між вузлами, інтервал між якими найближче відповідає оцінці оптимальної

затримки, а решта штрафуються пропорційно відхиленню від цього значення.

Таким чином, знайдене значення $\tau_{\text{beg, end}}^*$ використовується для коригування стандартного механізму уваги з часовим затуханням [6]. Вага уваги між вузлами beg та end для події у момент t обчислюється як:

$$\alpha_{\text{beg, end}}(t) = \text{softmax} \left(\frac{Q_{\text{beg}} \cdot K_{\text{end}}^T}{\sqrt{d}} - \lambda \cdot \left| \Delta t_{\text{beg, end}} - \tau_{\text{beg, end}}^* \right| \right), \quad (2)$$

де $\Delta t_{\text{beg, end}}$ – фактичний часовий інтервал між подіями у вузлах;

λ – параметр загасання;

d – розмірність ключів.

Вираз $\lambda \cdot \left| \Delta t_{\text{beg, end}} - \tau_{\text{beg, end}}^* \right|$ задає штраф для зв'язків, для яких фактичний інтервал суттєво відхиляється від отриманої оцінки оптимальної затримки, і тому можна явно розрізнити синхронні та асинхронні каузальні пари (тобто послідовності важливих і неважливих подій).

Етап 3. Кодування часу з фазовим зсувом та адаптивне об'єднання представлень.

На цьому етапі оцінка $\Delta t_{\text{beg, end}}$ вбудовується безпосередньо у кодування часу кожної каузальної пари через фазовий зсув, а адаптивний вентиляльний механізм зважає внесок нового кодування відносно поточного прихованого стану вузла, що дозволяє регулювати ступінь темпоральної корекції залежно від конкретної каузальної пари.

Стандартне Фур'є-кодування часу [6] розширюється за рахунок визначення параметрів фази $\{\varphi_k\}$. Останні ініціалізуються нулем і потім навчаються через зворотне поширення похибки. Призначення параметрів фази φ_k полягає у тому, що вони кодують характерний патерн зсуву між часом настання події-причини та часом появи відповідної події-наслідку. Такий патерн є індивідуальним для кожної пари подій.

Адаптивне об'єднання представлень виконується за допомогою вентиляльного механізму:

$$\tilde{h}_{\text{end}} = g h_{\text{end}} + (1-g) \text{Agg} \left(\alpha_{\text{beg, end}}(t), \Phi \left(t, \tau_{\text{beg, end}}^* \right) \right), \quad (3)$$

де g – вентиляльний параметр, що має скалярну вагу від 0 до 1 і навчається з усіма іншими параметрами мережі.

Вентиляльний параметр g визначає, наскільки поточний стан вузла h_{end} зберігається без змін, і наскільки він замінюється агрегованим темпорально-скоригованим представленням.

Інформаційна технологія побудови пояснень щодо рішень інтелектуальної системи на основі темпорального порядку вхідних даних.

Розроблена інформаційна технологія включає п'ять етапів, що інтегрують результати досліджень

[13–15], та розроблений метод обробки темпоральної затримки.

Етап 1. Попередня обробка вхідних даних.

На цьому етапі потоки подій, які можуть бути отримані із різномісних джерел, зокрема реляційних баз даних, поточних платформ та зовнішніх API, стандартизуються, в тому числі виконується перетворення міток часу у єдиний формат із збереженням відносних часових інтервалів між подіями.

Додатково виконується перевірка монотонності часових міток та усунення дублікатів з однаковими позначками часу.

Етап 2. Адаптивне формування темпоральних графів подій.

Динамічний граф залежностей між подіями формується на основі методу адаптивного вибору інтервалів, представленою в роботі [13]. Множина дуг графа визначається лише для тих пар вузлів, для яких кроскореляційна функція перевищує заданий поріг.

Такий підхід дає можливість скоротити обчислювальні витрати та підвищує точність представлення залежностей.

Етап 3. Побудова TGNN з обробкою темпоральної затримки.

Навчання TGNN-архітектури [14] виконується із використанням методу обробки темпоральної затримки. Наведені значення параметрів у виразах (1) – (3) навчаються у рамках єдиного циклу зворотного поширення.

Особливість даного етапу інформаційної технології полягає в тому, що функція втрат включає дві складових: стандартну втрату та регуляризатор, який штрафує за некаузальні залежності.

Етап 4. Генерація пояснень.

Пояснення формується на основі підграфів, що містять значущі причинно-наслідкові зв'язки згідно дослідженню [15].

Етап 5. Верифікація пояснень та представлення отриманих результатів.

Верифікація пояснень виконується з використанням інтервальної темпоральної логіки. Результати надаються через відповідний інтерфейс, наприклад REST API, React тощо.

Експериментальна перевірка розробленого методу.

Експериментальну перевірку виконано на наборі даних системи електронної комерції. Такий набір містить події покупок товарів із мітками часу. При проведенні експерименту оцінювались MAE lag, тобто середня похибка оцінювання затримки та частка пояснень, що відображають каузальні залежності. Порівняння виконувалось з архітектурами TGAT, яка оперує увагою для темпорального графа з урахуванням зміни у часі, та TGN, яка відрізняється від архітектури TGAT явною пам'яттю вузлів.

Тобто вершити графа мають внутрішній стан, який оновлюється при кожній вхідній події. Результати експериментальної перевірки представлено в табл. 1.

Зростання частки пояснень, які відображають каузальні залежності, свідчить, що запропонований метод враховує не лише детерміновану і стохастичну, а й циклічну затримку.

Перевага запропонованого методу обробки темпоральних затримки у каузальних залежностях полягає у можливості адаптуватись до різних типів затримок (детермінованих, стохастичних, циклічних) у процесі побудови пояснень.

Таблиця 1 – Експериментальна перевірка методу обробки темпоральних затримок для каузальних залежностей

Метод	MAE затримки	Частка пояснень, що відображає каузальні залежності
TGAT [6]	9,7	0,57
TGN [7]	6,3	0,59
Запропонований метод	3,1	0,64

Метод має обмеження щодо застосування, оскільки оцінювання $\tau_{\text{beg, end}}^*$ згідно (1) потребує достатньої кількості спостережень. Для каузальних пар, які нечасто зустрічаються у вхідних даних, оцінка може бути неточною.

Подальші дослідження пов'язані із врахуванням транзитивних ланцюжків затримок, що може бути використано при вирішенні задач, для яких потрібні розгалужені причинно-наслідкові структури.

Висновки. Запропоновано метод обробки темпоральних затримок у каузальних залежностях між вузлами динамічного графа темпоральної графової нейронної мережі, який відрізняється від відомих підходів поєднанням компонентів кореляційного оцінювання оптимального темпорального зміщення, кодування часу з фазовим зсувом та адаптивного об'єднання отриманих представлень, що забезпечує врахування каузальних залежностей у поясненнях на основі оцінювання часових затримок.

Запропоновано інформаційну технологію побудови пояснень щодо рішень інтелектуальної системи на основі темпорального порядку вхідних даних, яка включає етапи адаптивного формування темпоральних графів подій, побудову темпоральної графової нейронної мережі з обробкою темпоральної затримки, генерацію та подальшу верифікацію пояснень на основі темпоральної алгебри, що забезпечує формування пояснень з урахуванням змін у порядку вхідних подій інтелектуальної системи.

Виконана експериментальна перевірка підтвердили, що метод обробки темпоральної затримки забезпечує адаптацію до детермінованої, стохастичної і циклічної затримки.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при написанні тексту цієї роботи.

Список використаних джерел інформації

- Arrieta A. B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J., Bannetot A., Tabik S., Barbado A., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins R., Chatila R., Herrera F. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*. 2020. Vol. 58. P. 82–115. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.12.012.

- Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A Survey of Methods for Explaining Black Box Models. *ACM Computing Surveys*. 2018. Vol. 51, no. 5. Article 93. P. 1–42. DOI: 10.1145/3236009.
- Ying R., Gu R., Yu K., Bourgeois D., You J., Zitnik M., Leskovec J. GNNExplainer: Generating Explanations for Graph Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*. 2019. Vol. 32. P. 9244–9255.
- Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML 2017)*. PMLR 70. 2017. P. 3319–3328.
- Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016)*. 2016. P. 1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
- Xu D., Ruan C., Korpeoglu E., Kumar S., Achan K. Inductive Representation Learning on Temporal Graphs. *Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations (ICLR 2020)*. 2020.
- Rossi E., Chamberlain B., Frasca F., Eynard D., Monti F., Bronstein M. Temporal Graph Networks for Deep Learning on Dynamic Graphs. *ICML 2020 Workshop on Graph Representation Learning and Beyond (GRL+)*. 2020. arXiv:2006.10637.
- Pareja A., Domeniconi G., Chen J., Ma T., Suzumura T., Kanezashi H., Kaler T., Schardl T., Leiserson C. EvolveGCN: Evolving Graph Convolutional Networks for Dynamic Graphs. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 34, no. 04. P. 5363–5370. DOI: 10.1609/aaai.v34i04.5984.
- Чала О. В. Побудова темпоральних правил для представлення знань в інформаційних системах управління. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09.
- Чала О. В. Модель узагальненого представлення темпоральних знань в інтелектуальних інформаційних системах управління. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 2. С. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05.
- Ismail Fawaz H., Forestier G., Weber J., Idoumghar L., Muller P.-A. Deep Learning for Time Series Classification: a Review. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2019. Vol. 33, no. 4. P. 917–963. DOI: 10.1007/s10618-019-00619-1.
- Ye B., Yang S., Hu B., Zhang Z., He Y., Huang K., Zhou J., Fang Y. Gaia: Graph Neural Network with Temporal Shift Aware Attention for Gross Merchandise Value Forecast in E-commerce. *Proceedings of the 38th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE 2022)*. 2022. P. 1–13. DOI: 10.1109/ICDE53745.2022.00245.
- Чалий С. Ф., Кравченко Р. В. Метод адаптивного вибору інтервалів часу для побудови графів темпоральних графових нейронних мереж. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2025. № 2 (12). С. 4–11. DOI: 10.20998/2079-0023.2025.02.01.
- Чалий С. Ф., Кравченко Р. В. Графова нейронна мережа для темпорально упорядкованих даних у задачі побудови пояснень в інтелектуальній системі. *Сучасні інформаційні системи*. 2025. Т. 9, № 2. DOI: 10.20998/2522-9052.2025.2.XX.
- Чалий С. Ф., Кравченко Р. В. Метод побудови темпорально узгоджених пояснень в інтелектуальних системах на основі темпоральних графових нейронних мереж. *Сучасні інформаційні системи*. 2025. Т. 9, № 3. DOI: 10.20998/2522-9052.2025.3.XX.

References (transliterated)

- Arrieta A. B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J., Bannetot A., Tabik S., Barbado A., García S., Gil-López S., Molina D., Benjamins R., Chatila R., Herrera F. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*. 2020, vol. 58, pp. 82–115. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.12.012.
- Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A Survey of Methods for Explaining Black Box Models. *ACM Computing Surveys*. 2018, vol. 51, no. 5, article 93, pp. 1–42. DOI: 10.1145/3236009.
- Ying R., Gu R., Yu K., Bourgeois D., You J., Zitnik M., Leskovec J. GNNExplainer: Generating Explanations for Graph Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*. 2019, vol. 32, pp. 9244–9255.

4. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (ICML 2017)*. PMLR 70. 2017, pp. 3319–3328.
5. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. “Why Should I Trust You?”: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 2016)*. 2016, pp. 1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
6. Xu D., Ruan C., Korpeoglu E., Kumar S., Achan K. Inductive Representation Learning on Temporal Graphs. *Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations (ICLR 2020)*. 2020.
7. Rossi E., Chamberlain B., Frasca F., Eynard D., Monti F., Bronstein M. Temporal Graph Networks for Deep Learning on Dynamic Graphs. *ICML 2020 Workshop on Graph Representation Learning and Beyond (GRL+)*. 2020. arXiv:2006.10637.
8. Pareja A., Domeniconi G., Chen J., Ma T., Suzumura T., Kanezashi H., Kaler T., Schardl T., Leiserson C. EvolveGCN: Evolving Graph Convolutional Networks for Dynamic Graphs. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2020, vol. 34, no. 04, pp. 5363–5370. DOI: 10.1609/aaai.v34i04.5984.
9. Chala O. V. Pobudova temporalnykh pravyl dlia predstavleniia znan v informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2018, vol. 2, no. 3, pp. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09. (In Ukr.)
10. Chala O. V. Model uzahalnenoho predstavleniia temporalnykh znan v intelektualnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2020, vol. 4, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. (In Ukr.)
11. Ismail Fawaz H., Forestier G., Weber J., Idoumghar L., Muller P.-A. Deep Learning for Time Series Classification: a Review. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2019, vol. 33, no. 4, pp. 917–963. DOI: 10.1007/s10618-019-00619-1.
12. Ye B., Yang S., Hu B., Zhang Z., He Y., Huang K., Zhou J., Fang Y. Gaia: Graph Neural Network with Temporal Shift Aware Attention for Gross Merchandise Value Forecast in E-commerce. *Proceedings of the 38th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE 2022)*. 2022, pp. 1–13. DOI: 10.1109/ICDE53745.2022.00245.
13. Chalyi S. F., Kravchenko R. V. Metod adaptivnoho vyboru intervaliv chasu dlia pobudovy hrafiiv temporalnykh hrafovnykh neuronnykh merezh. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii*. 2025, no. 2 (12), pp. 4–11. DOI: 10.20998/2079-0023.2025.02.01. (In Ukr.)
14. Chalyi S. F., Kravchenko R. V. Hrafova neironna merezha dlia temporalno vporiadkovanykh danykh u zadachi pobudovy poiasnen v intelektualnii systemi. *Suchasni informatsiini systemy*. 2025, vol. 9, no. 2. DOI: 10.20998/2522-9052.2025.2.XX. (In Ukr.)
14. Chalyi S. F., Kravchenko R. V. Metod pobudovy temporalno uzgodzhenykh poiasnen v intelektualnykh systemakh na osnovi temporalnykh hrafovnykh neuronnykh merezh. *Suchasni informatsiini systemy*. 2025, vol. 9, no. 3. DOI: 10.20998/2522-9052.2025.3.XX. (In Ukr.)

Надійшла (received) 20.03.2026
Прийнята (accepted) 10.04.2026
Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.8:004.9

S. F. CHALYI, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

R. V. KRAVCHENKO, Postgraduate Student of the Department of Information Control Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: rostyslav.kravchenko1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0324-3597>

INFORMATION TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTING EXPLANATIONS USING TEMPORALLY ORDERED INPUT DATA OF AN INTELLIGENT SYSTEM

The subject of the article is the process of generating explanations for the decisions of intelligent systems whose input data are temporally ordered sequences of events with time delays. The aim of the work is to develop an approach to constructing explanations for the decisions of intelligent systems with temporally ordered input data that takes into account time delays in the input event sequences. To achieve this aim, the following tasks are addressed: to develop a method for processing temporal delays that includes a delay estimation component based on the cross-correlation function and a time-encoding component; to develop an information technology for constructing explanations for the decisions of an intelligent system based on the temporal order of input data, which integrates the developed method into a single pipeline for explanation construction and verification; to carry out experimental evaluation of the method and the information technology. A method for processing temporal delays in causal dependencies between nodes of a dynamic graph in a temporal graph neural network is proposed, which differs from known approaches by combining components of correlation-based estimation of optimal temporal shift, phase-shifted time encoding, and adaptive fusion of the obtained representations, thereby enabling the incorporation of causal dependencies into explanations through the estimation of time delays. An information technology for constructing explanations for the decisions of an intelligent system based on the temporal order of input data is proposed, which includes the stages of adaptive construction of temporal event graphs, building a temporal graph neural network with temporal delay processing, generation and subsequent verification of explanations based on temporal algebra, thus providing the formation of explanations that take into account changes in the order of the intelligent system's input events. The experimental evaluation has confirmed that the temporal delay processing method adapts to deterministic, stochastic, and cyclic delays.

Keywords: explainable artificial intelligence; temporal delay; temporal dependencies; causal dependencies; temporal graph neural network; information technology

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чалий Сергій Федорович / Chalyi Serhii Fedorovich

Автор 2 / Author 2: Кравченко Ростислав Вікторович / Kravchenko Rostyslav Viktorovich

A. M. KOPP, Doctor of Philosophy (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department, Kharkiv, Ukraine, e-mail: andrii.kopp@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

I. P. GAMAYUN, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Full Professor of Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department, Kharkiv, Ukraine, e-mail: ihor.hamaiun@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-4658>

R. B. DASHKIVSKYI, Postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: roman.dashkivskiy@cs.kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8066-3622>

Ye. R. KOSTIN, Postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: yehor.kostin@cs.kphi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5042-0795>

INFORMATION TECHNOLOGY FOR OPTIMAL SERVICE PLACEMENT PREDICTION IN A MULTI-CLOUD ENVIRONMENT USING MACHINE LEARNING

The relevance of the work is due to the need to improve the efficiency of service distribution management in multi-cloud infrastructures, where optimal service placement directly affects latency, performance, reliability, and rational use of resources. The object of the study is the process of placing cloud services in a multi-provider environment. The subject of the study includes machine learning methods and algorithms that are used to predict optimal decisions for placing cloud services in a multi-provider environment based on measured performance indicators. The purpose of the study is to develop and evaluate models for predicting optimal placement of cloud services in a multi-provider environment using historical data on latency, response time, and load balancing efficiency. The work uses an open dataset, the Multi-Cloud Service Composition Dataset, which contains characteristics of services from AWS, Azure, Google Cloud, and IBM providers. Six machine learning algorithms implemented using the Python programming language and the Scikit-learn library were used for prediction. The obtained results showed that models based on Gradient Boosting and Naive Bayes provide the highest consistency of the metrics Accuracy, Precision, Recall and F1-score, reaching values of about 0.97–0.98, which confirms their suitability for the tasks of optimizing the placement of cloud services in a multi-cloud environment. Other developed models demonstrated lower stability of results, which limits their application in real conditions. The conclusions substantiate the possibility of using machine learning methods and algorithms to build adaptive load management systems in multi-cloud environments, and also identify prospects for expanding the proposed information technology by including additional parameters, such as energy consumption, computing cost and fault tolerance.

Keywords: machine learning, cloud computing, cloud infrastructure, optimal service placement, prediction models, information technology.

Problem statement. The rapid growth of multi-cloud infrastructures creates a need for accurate and adaptive methods of deploying services that operate in environments with different providers, different performance metrics, and variable load conditions.

Optimal service placement determines latency, throughput, stability, and resource efficiency. However, current approaches remain fragmented. Some research focuses on search and heuristic methods for configuring multi-cloud solutions but does not take into account the complexity of real-world performance metrics [1].

Other works demonstrate the development of multi-cloud frameworks, but are mainly focused on specific applications, which does not allow them to be directly used for the general task of optimal service placement [2]. A separate area of research applies Machine Learning (ML) to solve placement problems in uncertain environments, but these studies mainly cover edge infrastructures rather than multi-cloud systems with heterogeneous providers [3].

Thus, the problem of creating a universal approach that combines the processing of performance metrics, machine learning, and the ability to accurately predict the optimal placement of services in a multi-cloud environment remains unresolved.

This creates a scientific challenge – to develop models capable of consistently determining optimal placement based on various indicators, ensuring high accuracy and practical applicability in dynamic IT systems.

Related work. The problem of service placement in hybrid and multi-cloud environments is actively being researched in the context of combining cloud and fog infrastructure. In their work, Azizi et al. propose the FLEX platform for scalable and flexible service deployment in multi-fog and multi-cloud environments, where the task is formulated as an integer linear programming problem and solved by a heuristic algorithm to minimize cost and delays [4]. A similar approach is developed by Dogani et al., who consider a two-layer scheme for deploying services in containerized fog-cloud platforms and apply NSGA-II to simultaneously optimize latency, power consumption, and cost [5]. Both works focus on optimization and evolutionary methods, but do not use classical machine learning methods for direct prediction of the “optimality” of placement based on empirical performance metrics.

A separate branch of research is devoted to dynamic service placement in 5G/6G scenarios and edge infrastructures. Tabatabaei et al. analyze dynamic service placement in 6G multi-cloud scenarios, taking into account low latency and reliability requirements, and propose an approach to placement management in complex network environments [6]. Lu et al. develop the Dynamic Service Placement with Deep Reinforcement Learning (DSP-DRL) framework for dynamic service placement in mobile edge computing using deep reinforcement learning to minimize total delay under resource and cost constraints [7]. These works demonstrate the potential of reinforcement learning

© Kopp A. M., Gamayun I. P., Dashkivskiy R. B., Kostin Ye. R., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



for adaptive placement, but mostly work in the context of edge/fog, rather than for optimal service placement tasks between several large cloud providers with explicit performance metrics.

Another area is related to the application of machine and deep learning for resource allocation tasks in cloud systems. In a recent review, Zhou et al. systematize methods based on deep reinforcement learning for resource planning tasks in cloud environments, demonstrating their advantage over classical heuristics in scenarios with dynamic loads and multi-criteria objectives [8]. Bodra and Khairnar perform a comparative analysis of modern machine learning algorithms for cloud resource allocation, including DRL, neural networks, and traditional ML methods, and demonstrate significant improvements in execution time, cost, and energy consumption compared to

[10]. The dataset was used to build prediction models that allow the optimal placement of services in heterogeneous multi-provider environments to be evaluated.

The research methodology (Fig. 1) was based on the use of ML methods implemented in the Google Colab [11] using the Scikit-learn [12]. Preliminary data processing and preparation was performed, which included the selection of relevant attributes, their scaling, and distribution into training (75 %) and test subsets (25 %). This stage allowed us to form a consistent sample for correct comparison of models and obtaining stable results. The study selected six machine learning algorithms belonging to different model classes: Decision Tree, Random Forest, Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), k-Nearest Neighbors (k-NN), and Gradient Boosting (Fig. 2).

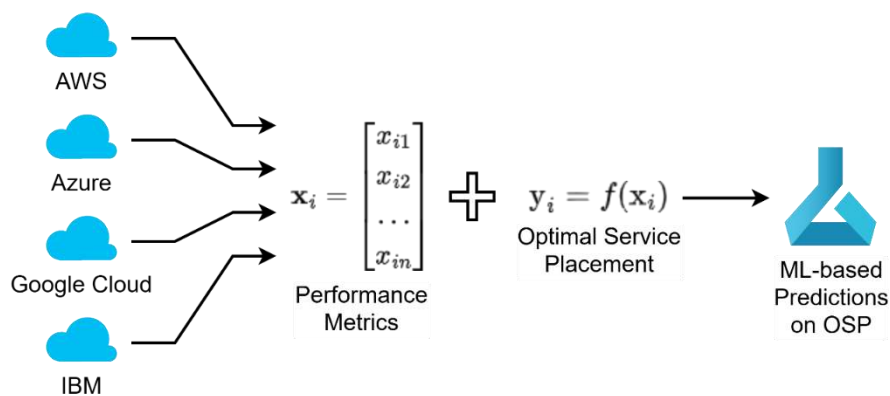


Fig. 1. Using machine learning to predict Optimal Service Placement (OSP) based on multi-cloud performance metrics

classical approaches [9]. However, these reviews focus primarily on general resource planning and allocation tasks (job scheduling, virtual machine placement, container allocation) and do not directly address the prediction of optimal service placement between specific multi-cloud providers based on integrated performance characteristics.

Thus, existing works demonstrate the importance of optimization, evolutionary, and DRL approaches for service placement and resource allocation tasks in cloud and fog-cloud infrastructures. At the same time, there remains a gap in the use of classical machine learning models for predicting the binary measure of placement optimality (e.g., optimal service placement) in multi-cloud environments based on measured metrics of latency, response time, and load balancing efficiency.

Research objective. The proposed research aims to fill this niche by using an open multi-cloud dataset and comparing several ML algorithms to support decisions on optimal service placement.

Materials and methods. The research was based on the open Multi-Cloud Service Composition Dataset [10], which contains measured performance characteristics of services in a multi-cloud environment. The dataset includes data on Service Latency (ms), Response Time (ms), and Load Balancing (%), as well as a target variable that indicates the optimality of service placement as a binary indicator. The data covers various types of services running on AWS, Azure, Google Cloud, and IBM infrastructures

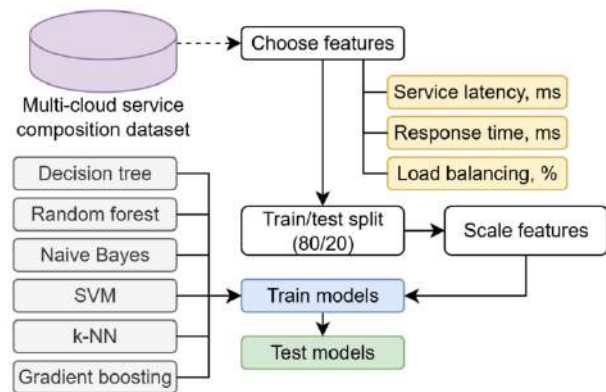


Fig. 2. ML-based workflow used in this study

The ML models were trained based on historical performance measurements [10] and then evaluated using standard classification performance metrics – Accuracy, Precision, Recall, and the F1-score [13]. We identified the algorithms that demonstrated the best consistency of results for the task of predicting optimal service placement.

The results presented in the figure demonstrate the high efficiency of the Decision Tree model (Fig. 3), which provided an Accuracy of 0.97, indicating an almost error-free classification of most cases.

A Precision of 0.96 means that the model rarely makes mistakes in determining the positive class. The Recall is

also 0.97, confirming the model’s ability to detect almost all relevant objects. The F1-score is 0.96, indicating a balanced performance between precision and recall.

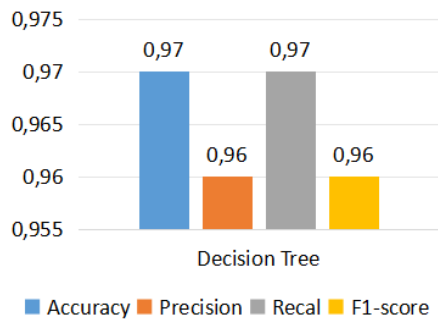


Fig. 3. Decision Tree model performance

The results for Random Forest indicate the high overall quality of the model (Fig. 4), which achieved an Accuracy of 0.96, meaning that most objects were classified correctly. The Precision is 0.91, which means a slightly higher number of false positives compared to the decision tree. At the same time, the Recall is 0.96, demonstrating the model's ability to effectively find almost all objects of the positive class. The F1-score of 0.93 reflects balance, but with a slight decrease compared to other metrics.

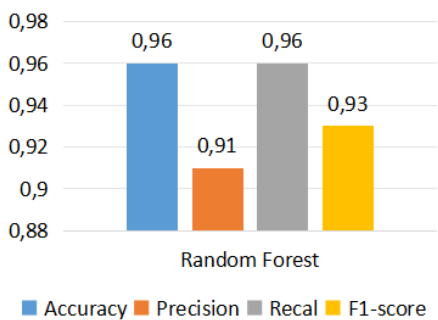


Fig. 4. Random Forest model performance

The results for Naive Bayes demonstrate consistently high model quality across all indicators, demonstrating its stability and consistency (Fig. 5).

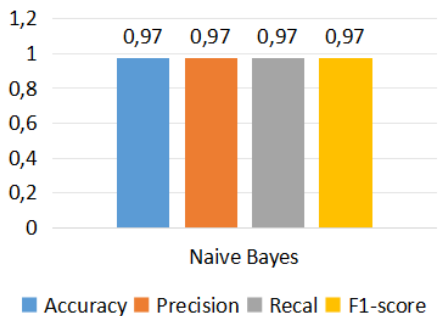


Fig. 5. Naive Bayes model performance

Accuracy is 0.97, meaning that the model correctly classifies the vast majority of cases. The Precision, Recall, and F1-score metrics are also 0.97, indicating no significant imbalance between the number of false positives and false

negatives. Such consistency in metrics indicates that Naive Bayes performs well in classification tasks and provides predictable behavior across the entire dataset.

The results for SVM show high overall model performance (Fig. 6), with an Accuracy of 0.96, indicating correct classification of most objects. The Precision is 0.91, indicating a slightly higher number of false positives compared to other metrics. At the same time, the Recall is 0.96, meaning that the model successfully detects almost all relevant cases. The F1-score of 0.93 demonstrates a balance between precision and recall, but with a slight decrease due to lower accuracy.

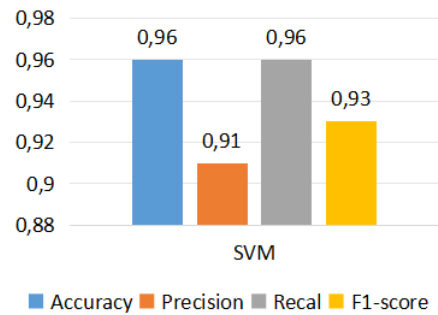


Fig. 6. SVM model performance

The results for k-NN demonstrate stable and consistent classification quality (Fig. 7). The model achieved an Accuracy of 0.95, which means that most examples were predicted correctly. The Precision score is 0.94, meaning that k-NN accurately identifies the positive class with a minimum number of false positives. Recall is 0.95, indicating effective detection of relevant cases. The F1-score of 0.95 confirms the balance of the model and the harmonious combination of accuracy and completeness.

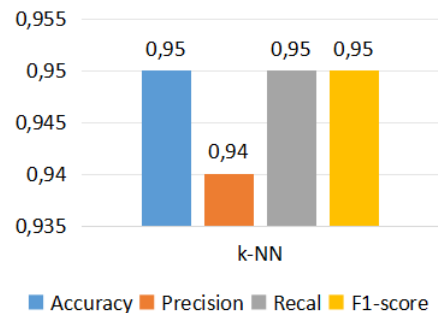


Fig. 7. k-NN model performance

The results for Gradient Boosting demonstrate the highest quality among all models considered (Fig. 8), as all key metrics have the same value of 0.98. An Accuracy of 0.98 indicates an almost error-free classification of examples. Precision and recall are also at 0.98, which means a very low number of false positives and false negatives. The F1-score of 0.98 confirms the complete balance of the model.

Such uniformity and the high performance measures show that Gradient Boosting provides the best consistency and stability among the algorithms, making it particularly effective for optimal service placement classification tasks in the experimental environment.

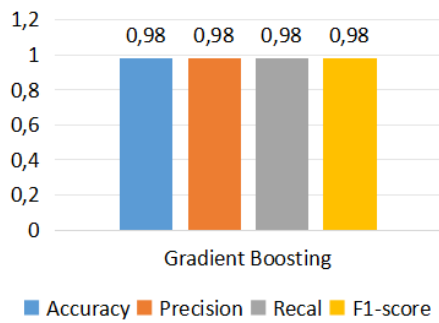


Fig. 8. Gradient Boosting model performance

The proposed intelligent information technology based on ML-algorithms provides automated collection of multi-cloud performance metrics using APIs (Application Programming Interface) and provider monitoring tools of the open access (Fig. 9):

- The system prepares and labels data according to predefined rules, forming a consistent set of measurements for training ML models.
- Models are trained and validated on the prepared dataset using specified hyperparameters and frameworks that implement ML algorithms.
- The information technology provides predictions for the OSP based on current performance metrics (e.g. latency, response time, and load balancing efficiency) and optimization policies.
- The obtained results are integrated with multi-cloud orchestration systems to support decision-making and automated service management.

Conclusions. The study confirmed the possibility of effectively applying ML methods and algorithms to predict the optimal service placement in multi-cloud environments based on the developed intelligent information technology (Fig. 9). Analysis of the results showed that Gradient Boosting and Naive Bayes models provide the highest

accuracy and consistency of performance indicators, making them suitable for practical tasks of optimizing performance and minimizing delays.

The use of an open multi-cloud dataset [12] made it possible to evaluate the behavior of algorithms in realistic conditions when working with different types of services and different cloud providers. The results demonstrate the promise of such ML models for building adaptive resource management and decision support information technology in modern cloud architectures.

Further research may focus on expanding the set of parameters, including energy and computing costs, and fault tolerance indicators. The use of hybrid models that combine “classical” ML with reinforcement learning algorithms to improve adaptability to dynamic loads is also promising. A separate problem is to test the models on significantly larger and more heterogeneous production datasets, which will allow us to evaluate the scalability of the proposed approach. In the future, a prototype could also be developed that would predict the optimal service placement in real time and interact with the infrastructure tools of cloud platforms.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT for rephrasing and reformulating the text, as well as DeepL for grammar and spell checking. After using these tools, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

1. Łazuka M., Parnell T., Anghel A. *Search-based methods for multi-cloud configuration*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2204.09437> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.09437>.
2. Brum R. C., Stelling de Castro M. C., Arantes L., Drummond L. M. de A., Sens P. *Multi-FedLS: A framework for cross-silo federated learning applications on multi-cloud environments*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2308.08967> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.08967>.

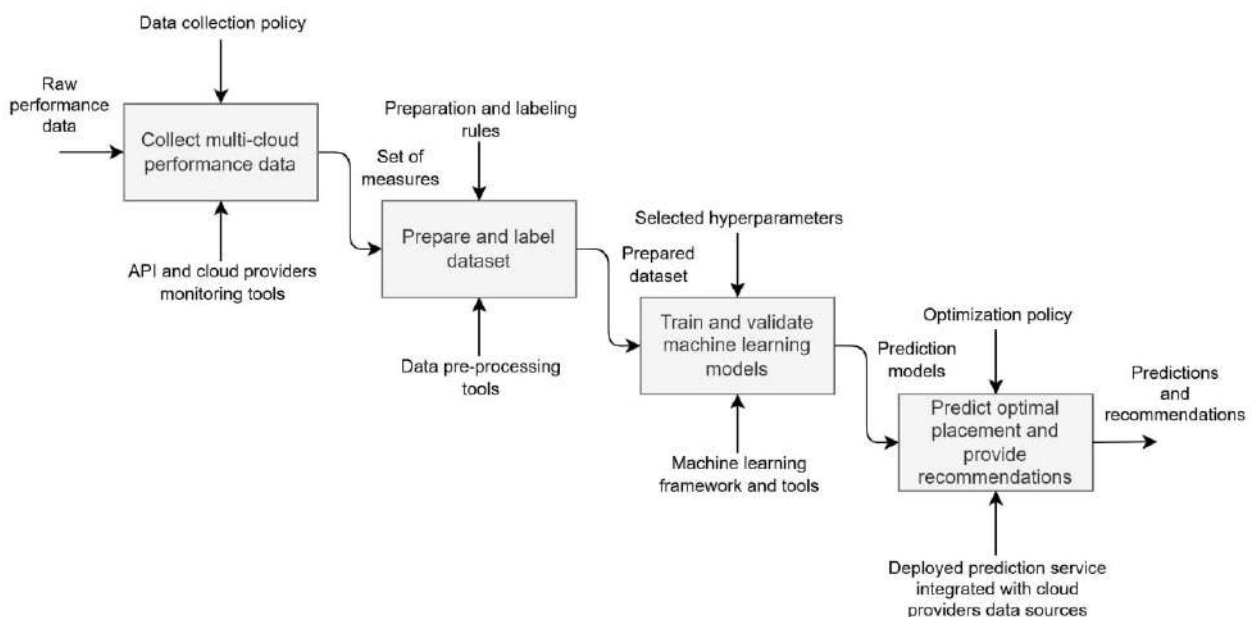


Fig. 9. Information technology to predict optimal placing of cloud services in a multi-provider environment

3. Hejazi T. H., Ghadimkhani Z., Borji A. *A learning-based solution approach to the application placement problem in mobile edge computing under uncertainty*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2403.11259> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.11259>.
4. Azizi S., Farzin P., Shojafar M., Rana O. *A Scalable and Flexible Platform for Service Placement in Multi-Fog and Multi-Cloud Environments*. *ResearchSquare*. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11227-023-05520-9> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05520-9>.
5. Dogani J., Yazdanpanah A., Zare A., Khunjush F. *A Two-tier Multi-Objective Service Placement in Container-based Fog-Cloud Computing Platforms*. *Preprint*. Available at: <https://scispace.com/pdf/a-two-tier-multi-objective-service-placement-in-container-34szay2e.pdf> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3130299/v1>.
6. Tabatabaei F., Khalili H., Requena M., Kahvazadeh S., Manguess-Bafalluy, J. (2023). *Dynamic Service Placement in 6G Multi-Cloud Scenarios*. Available at: <https://zenodo.org/records/10959481> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTON59386.2023.10207547>.
7. Lu S., et al. *A Dynamic Service Placement Based on Deep Reinforcement Learning in Mobile Edge Computing*. Available at: <https://www.mdpi.com/2673-8732/2/1/8> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.3390/network2010008>.
8. Zhou G., Tian W., Buyya R., Xue R., Song L. *Deep reinforcement learning-based methods for resource scheduling in cloud computing: A review and future directions*. Available at: <https://clouds.cis.unimelb.edu.au/papers/DRLCloudReview2024.pdf> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10756-9>.
9. Bodra D., Khairnar R. *Machine learning-based cloud resource allocation algorithms: A comprehensive comparative review*. Available at: <https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2025.1678976/pdf> (accessed: 21.01.2026). DOI: <https://doi.org/10.3389/fcomp.2025.1678976>.
10. *Supervised learning – scikit-learn 0.22 documentation*. Available at: https://scikit-learn.org/stable/supervised_learning.html (accessed: 21.01.2026).
11. *Google Colab*. Available at: <https://colab.google/> (accessed: 21.01.2026).
12. Ziya. *Multi-Cloud Service Composition Dataset*. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/ziya07/multi-cloud-service-composition-dataset> (accessed: 21.01.2026).
13. Dalianis H. *Clinical Text Mining*. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-78503-5_6 (accessed: 21.01.2026). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-78503-5_6.

Received 11.03.2026
Accepted 05.04.2026
Published 20.05.2026

УДК 004.9

А. М. КОПП, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: andrii.kopp@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

І. П. ГАМАЮН, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: ihor.hamaiun@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2099-4658>

Р. Б. ДАШКІВСЬКИЙ, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: roman.dashkivskyi@cs.khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8066-3622>

Є. Р. КОСТИН, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: yehor.kostin@cs.khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5042-0795>

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ПОСЛУГ У БАГАТОХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Актуальність роботи зумовлена потребою підвищення ефективності управління розподілом сервісів у багатохмарних інфраструктурах, де оптимальне розміщення послуг безпосередньо впливає на затримки, продуктивність, надійність та раціональне використання ресурсів. Об'єктом дослідження є процес розміщення хмарних послуг у середовищі з декількома провайдерами. Предметом дослідження виступають методи та алгоритми машинного навчання, які застосовуються для прогнозування оптимальних рішень щодо розміщення хмарних послуг у середовищі з декількома провайдерами на основі вимірюваних показників продуктивності. Метою дослідження є розробка та оцінювання моделей прогнозування оптимального розміщення хмарних послуг у середовищі з декількома провайдерами з використанням історичних даних про затримку, час відгуку та ефективність балансування навантаження. У роботі використано відкритий набір даних Multi-Cloud Service Composition Dataset, що містить характеристики сервісів провайдерів AWS, Azure, Google Cloud та IBM. Для прогнозування застосовано шість алгоритмів машинного навчання, реалізованих із застосуванням мови програмування Python та з використанням бібліотеки Scikit-learn. Отримані результати показали, що моделі на основі Gradient Boosting та Naive Bayes забезпечують найвищу узгодженість метрик Accuracy, Precision, Recall та F1-score, досягаючи значень близько 0.97–0.98, що підтверджує їхню придатність для задач оптимізації розміщення хмарних послуг у багатохмарному середовищі. Інші розроблені моделі продемонстрували нижчу стабільність результатів, що обмежує їх застосування в реальних умовах. У висновках обґрунтовано можливість використання методів і алгоритмів машинного навчання для побудови адаптивних систем керування навантаженням у багатохмарних середовищах, а також визначено перспективи розширення запропонованої інформаційної технології шляхом включення додаткових параметрів, таких як енергоспоживання, вартість обчислень та відмовостійкість.

Ключові слова: машинне навчання, хмарні обчислення, хмарна інфраструктура, оптимальне розміщення послуг, моделі прогнозування, інформаційна технологія.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Копп Андрій Михайлович / Kopp Andrii Mykhailovych

Автор 2 / Author 2: Гамаюн Ігор Петрович / Gamayun Igor Petrovych

Автор 3 / Author 3: Дашківський Роман Борисович / Dashkivskyi Roman Borysovych

Автор 4 / Author 4: Костін Єгор Романович / Kostin Yehor Romanovych

O. S. MOSTOVYI, PhD student, Department of Theory digital machine № 100, V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: alex@mostovyi.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6687-866X>

CONTROL FLOW GRAPH RECOVERY FOR DYNAMICALLY LOADED CODE VIA SYMBOLIC LIBRARY RESOLUTION

Control Flow Graphs are one of the main data sources for software analysis that use dynamic and static software analysis methods. Protected software and modern malware increasingly depend on dynamic code loading techniques to evade static analysis. Usage of runtime dynamic linking mechanisms introduces unresolved indirect calls that stop static Control Flow Graph recovery. This serves to hide dynamic library that can be used for prevention of security analysis. To address this limitation, an analysis technique is proposed that combines symbolic execution with speculative library preloading to recover Control Flow Graphs from binaries by using dynamic loading. The methodology uses custom software hooks that intercept dynamic loading operations during symbolic execution and perform actual library loading into the analysis state. The module is based on a two-level architecture that stores interception functions and instruction tracking at the same time, all within a symbolic execution environment. To avoid executing potentially malicious code that dynamic instrumentation tools require, the analysis was conducted entirely through symbolic execution, making it safe for malware analysis. For evaluation a batch of 16 synthetic benchmarks was used, employing various obfuscation techniques including encrypted library names, network-triggered loading, environment-derived paths, multi-stage decryption chains, fileless execution and manual executable and linkable format parsing. The experiments results show that module recovers on average 29.8 % additional Control Flow Graph nodes and 26.5 % additional edges compared to static analysis alone, achieves 100 % precision and 100 % recall in library detection, with all discoveries validated through Frida-based dynamic instrumentation.

Keywords: Binary analysis, control flow graph, dynamic loading, symbolic execution, malware analysis

Introduction. Modern software systems, such as browser plugins or enterprise applications, generally use the dynamic code loading technique. The code that is loaded at runtime cannot be detected by static analysis, representing a fundamental problem in assessing program behavior. Recovering control flow through dynamically loaded code would provide significant improvement in the security analysis and verification of software systems. A Control Flow Graph (CFG) is a graph representation of all possible execution paths through a program [1]. The vertices of a CFG are basic blocks – contiguous sequences of instructions with a single-entry point and single exit point. Exit points are control transfer instructions: conditional branches, unconditional jumps, function calls, and returns. The edges represent possible successors of each basic block and are therefore directed. Fig. 1 illustrates a simple CFG.

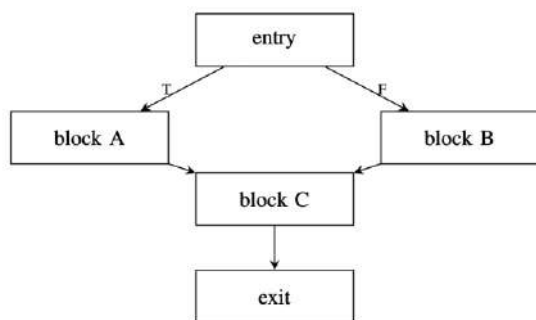


Fig. 1. A simple CFG with conditional branching.

Control Flow Integrity (CFI) is a security mechanism that checks a program's execution follows a predefined, valid path by using CFG [2,3]. This enables the detection and prevention attacks by ensuring that all indirect

branches conform to legitimate edges in the CFG. The study [4] used CFG similarity to match functionally equivalent code across different architectures, which appears to be useful when searching for known vulnerabilities in binaries compiled for unfamiliar platforms. On the malware analysis side, CFG topology has become a common feature for classification, though as demonstrated in [5] demonstrated, models relying on these features can be fooled through adversarial manipulation. What these applications share is a common dependency: their reliability degrades when the underlying CFG is incomplete or imprecise, particularly in the presence of constructs like dynamic code loading. Programs load executable code through various mechanisms: high-level Application Programming Interfaces (API) invoke the dynamic linker to load shared libraries; system calls map files or anonymous memory with execute permissions; and manual loaders parse binary formats directly. Each mechanism can load code from diverse sources: filesystem, network, encrypted blobs, or memory making the loaded code invisible to static analysis. Dynamically loaded code executes through indirect control transfers whose targets depend on runtime values. A function pointer stores an address returned by symbol resolution; a virtual method dispatch indexes into a dynamically constructed table; a return instruction pops an address placed on the stack by loaded code. Static analysis sees only the indirect transfer instruction, not its concrete target. These levels interact: a library loading operation returns a handle; symbol resolution uses that handle to obtain a function address; an indirect call uses that address to transfer control. Analyzing either level in isolation fails as we must track both how code is loaded and where resolved addresses flow to indirect transfers. Existing analysis software resolves these levels separately. Static disassemblers (IDA Pro [6,7], Ghidra [8]) recover CFGs from existing code but cannot

© Mostovyi O. S., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



analyze code that will be loaded at runtime. Dynamic instrumentation tools (PIN [9], Frida [10]) observe runtime behavior but require executing the binary, which is dangerous for malware analysis and is limited to executed paths. Symbolic execution frameworks (Angr [1], S2E [11]) explore paths symbolically but treat dynamic loading APIs as symbolic values that lose all information about loaded code.

Statement of the problem. The primary challenge in program analysis is that dynamic code loading operates at two interacting levels, which existing tools analyze independently, resulting in incomplete CFGs. The aim of this study was to develop and assess a safe analysis module that recovers complete CFGs by simultaneously intercepting all code-loading APIs and monitoring indirect control flow at the instruction level via symbolic execution, correlating events across both levels to reconstruct the full chain from library loading through to indirect invocation.

System-Level Evasion Techniques. While traditional analysis assumes libraries are loaded via standard, documented POSIX interfaces [12], target programs actively manipulate lower-level operating system constructs to map executable code into memory. The most prevalent system-level evasion mechanisms include:

1. **Internal API Abuse:** Programs can bypass standard linker artifacts by directly invoking glibc-internal functions, such as `__libc_dlopen_mode()`. This allows library loading without importing `dlopen` into the Executable and Linkable Format (ELF) [13] dynamic section.

2. **Fileless Execution via Anonymous Descriptors:** Using the `memfd_create` system call, a program can allocate a RAM-backed file descriptor that does not exist on the physical filesystem. Writing binary data to this descriptor and executing it via `/proc/self/fd/N` completely bypasses any analysis that monitors at the filesystem.

3. **Executable Memory Mapping:** Programs can skip the dynamic linker altogether by utilizing `open()` to acquire a file descriptor, followed by `mmap()` or `mmap64()` with `PROT_EXEC` permissions.

4. **Manual Relocation and Resolution:** In the worst cases, a binary maps a shared library into memory and manually parses its ELF headers, maps individual segments, processes relocations, and resolves symbols independent of the OS loader.

Furthermore, the string parameters passed to these mechanisms exhibit varying degrees of resolution complexity. These range from simple hardcoded strings to highly complex paths that are decrypted at runtime, assembled from environment variables, or received dynamically over network sockets.

Symbolic Execution. Because the previous string parameters are often unresolvable through static disassembly, our method relies on symbolic execution. This approach replaces concrete inputs with symbolic variables, tracks path conditions as mathematical constraints, and utilizes Satisfiability Modulo Theories (SMT) solvers to explore feasible execution paths. Our implementation extends `angr` [1], a binary analysis framework. Our CFG construction relies on several core abstractions:

1. **SimState:** The fundamental unit of analysis, encapsulating the program's registers, file descriptors, and

memory. Crucially, memory is modeled as a mapping to symbolic bitvectors, permitting simultaneous reasoning over both concrete addresses and symbolic data.

2. **CLE (CLE Loads Everything):** The framework's binary loader. CLE provides a `dynamic_load()` method that allows our module to inject additional libraries into the `SimState` execution, a critical requirement for simulating runtime loading.

3. **SimProcedures and Claripy:** `SimProcedures` are Python abstractions used to hook and replace specific library functions or system calls during execution. When these procedures encounter symbolic arguments, we use the `Claripy` constraint solving interface, built on `Z3` [14], to concretize the values against a set of known candidate libraries.

Architecture. Our module is based on a two-level architecture that combines API-level interception and instruction-level tracking at the same time, all within a symbolic execution environment, as shown in Fig. 2. Each intercepted function is modeled as a `SimProcedure` subclass. The analysis proceeds in five stages:

1. The target binary is loaded into `Angr`.

2. 42 custom `SimProcedures` are installed at Procedure Linkage Table (PLT) stubs and known function addresses.

3. Symbolic execution explores the binary, triggering `SimProcedures` at API calls and VEX [15] breakpoints at indirect control transfers.

4. A correlation engine links events across both levels.

5. The output is a complete CFG covering both the main binary and all discovered libraries.

Level 1 API. It consists of 42 `SimProcedures` divided into six categories (Table 1). Each intercepted function is modeled as a `SimProcedure` subclass. We adopt the naming convention `Dyn<FunctionName>` for these classes. For example, `DynDlopen` replaces the default `dlopen` `SimProcedure` and extends it with library resolution logic.

Table 1 – Intercepted functions by category

Category	Functions	Detection Purpose
Dynamic Loading	<code>dlopen</code> , <code>dlsym</code> , <code>dlclose</code> , <code>dlmopen</code> , <code>dlvsym</code> , <code>dladdr</code> , <code>dlinfo</code>	Standard library loading
Memory Ops	<code>mmap</code> , <code>mmap64</code> , <code>mprotect</code> , <code>mremap</code> , <code>memfd_create</code>	Executable mapping detection
Process Exec	<code>execve</code> , <code>execveat</code> , <code>fexecve</code> , <code>clone</code> , <code>clone3</code>	Process replacement
Security	<code>ptrace</code> , <code>prctl</code> , <code>setenv</code> , <code>putenv</code> , <code>process_vm_writev</code>	Anti-debug, code injection
Network	<code>socket</code> , <code>connect</code> , <code>recv</code> , <code>recvfrom</code> , <code>send</code> , <code>sendto</code> , <code>bind</code> , <code>listen</code> , <code>accept</code>	Network payload interception
File Operations	<code>open</code> , <code>openat</code> , <code>fopen</code> , <code>sigaction</code>	File Directory Tracking

The Dynamic Loading category (7 functions) handles the standard POSIX interface and its variants. `DynDlopen` extracts the path argument from `dlopen()`, resolves it through CLE's `dynamic_load()`, and returns a concrete

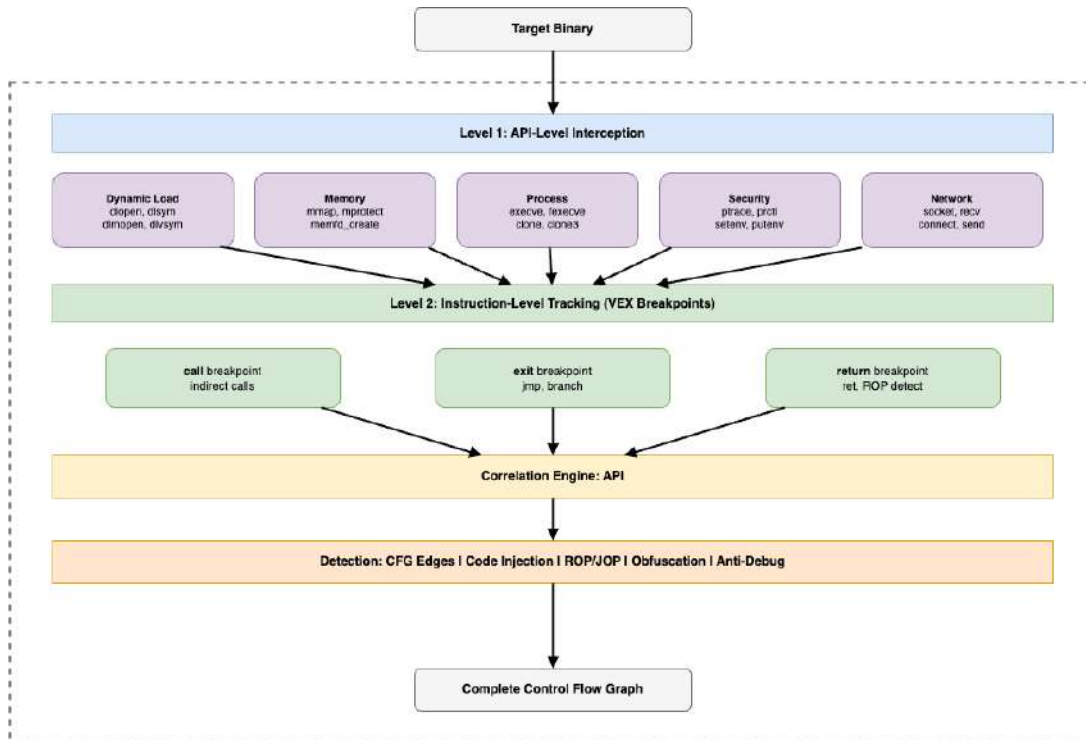


Fig. 2. Results of the population grouping

handle address. DynDlsym looks up the requested symbol in the corresponding library and returns a concrete function address. DynDlclose decrements the handle reference count. We also intercept dlopen for namespace-isolated loading, dlvsym for versioned symbol lookup, and the internal glibc function `__libc_dlopen_mode`. Concrete return values at this level are what allows Level 2 to resolve indirect call targets.

The Memory Operations category (5 functions) detects executable regions created outside the dynamic linker, `open` and `openat` record mappings between file descriptors and filesystem paths in an `fd_to_path` dictionary. When `mmap` or `mmap64` is called with `PROT_EXEC` on a file-backed region, the corresponding path is retrieved from this dictionary. `DynMprotect` catches permission changes from writable to executable, `DynMemfdCreate` detects fileless loading, where a library is written to an anonymous memory-backed descriptor and loaded through `dlopen(/proc/self/fd/N)`.

The Process Execution category (5 functions) covers `execve`, `execveat`, and `execve` for detecting process image replacement, as well as `clone` and `clone3` for tracking new threads or processes that may load code independently.

The Security category (5 functions) intercepts `ptrace` to detect anti-debugging checks, `prctl` for process attribute changes, `setenv` and `putenv` for environment variable manipulation that may affect library search paths, and `process_vm_writev` for cross-process memory writes used in code injection.

The Network category (9 functions) intercepts `socket`, `connect`, `recv`, `recvfrom`, `send`, `sendto`, `bind`, `listen`, and `accept`. These are necessary for cases where the `dlopen()`

argument is entirely received from a remote source and has no representation in the binary itself.

The File Operations category (4 functions) includes `open`, `openat`, and `fopen` for establishing file descriptors to file paths, providing data that the Memory Operations group needs. It also monitors `sigaction` for tracking signal handler registration that may trigger deferred library loading.

A central problem at this level is that path arguments passed to `dlopen()` may be symbolic, meaning they are encrypted, computed at runtime, or received from external input. The default `angr SimProcedure` for `dlopen` returns an unconstrained symbolic value and loses all loading information. Our replacement performs concrete resolution instead. All `SimProcedures` share the unified string extraction method presented in Fig. 3.

Algorithm 1 (UnifiedStringExtraction) handles three cases. If the pointer itself is symbolic, it returns a symbolic pointer indicator. If the loaded data is concrete, it decodes and returns the string directly. If the data is symbolic, the algorithm iterates over known candidate strings and checks whether each one satisfies the current path constraints through the SMT solver. When a satisfying candidate is found, the constraint is added and the string is returned. If no candidate matches, a fallback scans the binary for `.so` references, system library paths, and user search directories.

Level 2 Instruction-Level Tracking. It operates on the VEX intermediate representation and monitors indirect control flow transfers during symbolic execution [15]. Where Level 1 determines what is loaded, Level 2 determines where the resolved addresses are used. Before inter-

pretation, angr lifts each machine instruction into VEX IR. Three breakpoint types registered on the symbolic state are:

Algorithm 1 UnifiedStringExtraction

Require: State s , pointer p , max length L , encoding E
Ensure: Concrete string, symbolic AST, or error

```

1: if solver.symbolic( $p$ ) then
2:   return SYMBOLICPOINTER
3: end if
4: addr ← solver.eval( $p$ )
5: data ← memory.load(addr,  $L$ ,  $E$ )
6: if ¬solver.symbolic(data) then
7:   return decode(solver.eval(data),  $E$ )
8: end if
9: {Symbolic string: attempt speculative resolution}
10: candidates ← GetPreloadedCandidates()
11: for each  $c \in$  candidates do
12:   if solver.satisfiable(data = encode( $c$ ,  $E$ )) then
13:     solver.add(data = encode( $c$ ,  $E$ ))
14:     return  $c$ 
15:   end if
16: end for
17: return SYMBOLICSTRING(data)

```

Fig. 3. Algorithm 1 Unified String Extraction

1. Call breakpoints fire before every call instruction. If the target matches an address previously returned by module class DynDlsym or obtained through manual symbol lookup, a CFG edge is recorded from the call site to the target function.

2. Exit breakpoints fire before every jmp and conditional branch. They capture indirect jumps targeting dynamically resolved addresses and help identify control flow flattening dispatchers – blocks that branch to many successors based on a state variable.

3. Return breakpoints fire before every ret instruction. They examine the return address on the stack to detect Return-oriented programming (ROP) [16] redirection to dynamically loaded code.

When a breakpoint encounters a symbolic target, Algorithm 2 is applied, shown in Fig. 4. For each known executable region, the algorithm constrains the target to fall within the region's address range. If the constraint is satisfiable, the solver evaluates a concrete address under that constraint. The collected addresses form the set of possible call targets, all guaranteed to point to valid executable code.

Algorithm 2 Symbolic Target Resolution

Require: State s , symbolic target t
Ensure: Set of concrete addresses

```

1: solutions ← ∅
2: regions ← GETEXECUTABLEREGIONS()
3: for each (start, end) ∈ regions do
4:    $c \leftarrow (t \geq \text{start}) \wedge (t \leq \text{end})$ 
5:   if  $s$ .solver.satisfiable( $c$ ) then
6:     addr ←  $s$ .solver.eval( $t$ , extra = [ $c$ ])
7:     solutions ← solutions ∪ {addr}
8:   end if
9: end for
10: return solutions

```

Fig. 4. Algorithm 2 Symbolic Target Resolution

Correlation Engine. The correlation engine maintains three types of mappings across levels. First, file descriptors are mapped to filesystem paths – populated when Level 1 intercepts open calls and consumed when mmap is intercepted with PROT_EXEC. Second, library handles are mapped to loaded library objects – populated by class DynDlopen and consumed by other class DynDlsym. Third, resolved symbol addresses are mapped to their call sites – populated at Level 1 and matched at Level 2 to the indirect calls detected through breakpoints. The engine also performs taint tracking. Data received through recv() is marked as tainted, and if it later appears as a dlopen() argument, the engine records the complete data flow from network input to library loading.

Algorithm 3 (CFF Dispatcher Detection) searches the recovered CFG for control flow flattening patterns. Algorithm 4 (SMC and Inline Hook Detection) classifies write operations to executable memory. When such a write is detected, the original bytes are read and the new data is classified. A JMP and CALL pattern triggers a hook report with the computed relative target. A PUSH followed by RET – common in ROP chains – produces a PUSH or RET redirect report with the pushed address.

Evaluation. To enable complete evaluation, a suite of 16 benchmarks was created. These benchmarks cover a wide range of scenarios, from simple dynamic loading to advanced malware evasion techniques. For each benchmark, a dedicated binary was built to exercise a specific loading pattern. Table 2 shows which intercepted functions are involved in detecting each technique.

The module was assessed using a four-phase pipeline that compares a static baseline CFG with the CFG produced after dynamic library discovery (Fig. 5).

Algorithm 5 Evaluation Pipeline

Require: Binary b , library search paths \mathcal{P} , ground truth \mathcal{G}
Ensure: Static CFG metrics, module CFG metrics, validation status

```

1:
2: Phase 1: Static Baseline
3:  $P_s \leftarrow \text{LOADBINARY}(b, \text{auto\_load\_libs}=\text{False})$ 
4:  $\text{CFG}_s \leftarrow \text{CFGFAST}(P_s)$ 
5:
6: Phase 2: Dynamic Library Discovery
7:  $P_m \leftarrow \text{LOADBINARY}(b, \text{auto\_load\_libs}=\text{False})$ 
8: Install 42 SimProcedure hooks on  $P_m$ 
9:  $\sigma_0 \leftarrow \text{ENTRYSTATE}(P_m)$ 
10:  $\text{simgr} \leftarrow \text{SIMULATIONMANAGER}(\sigma_0)$ 
11: while |simgr.active| > 0 do
12:   simgr.STEP()
13:   Prune active states to  $\leq 32$ 
14: end while
15:  $\mathcal{L} \leftarrow \text{RECURSIVESCAN}(\text{DYNDLOPEN.LIBRARIES})$ 
16:
17: Phase 3: Module CFG Construction
18:  $\text{CFG}_m \leftarrow \text{CFGFAST}(P_m)$  {now includes  $\mathcal{L}$ }
19:
20: Phase 4: Validation
21: for all  $\ell \in \mathcal{L}$  do
22:   FRIDAVALIDATE( $b$ ,  $\ell$ )
23: end for

```

Fig. 5. Algorithm 5 Evaluation Pipeline

Both CFGs are generated through the same analysis – the only difference is that the module CFG includes libraries resolved and loaded by our module. The difference between the two graphs directly reflects the module's

contribution. For each benchmark, recall is computed as the proportion of ground-truth libraries found, and precision as the proportion of discoveries that match the ground truth. The CFG improvement is measured through three metrics: additional nodes, additional edges, and additional functions. Every discovery is validated independently using Frida-based dynamic instrumentation.

Environment. All experiments are completed inside Docker containers running Ubuntu 22.04 LTS with Python 3.11 and Angr 9.2.98. The host system is an Apple MacBook with M-series ARM64 processor running macOS and Docker.

Verification. All 16 benchmark binaries are compiled as ELF 64-bit ARM64 executables using GCC 11.4 with default optimization level to preserve the original control flow structure of each evasion technique [17]. Payload libraries are compiled as independent shared objects. Each benchmark is executed in an isolated container instance to prevent issues between experiments. Analysis times are measured as durations averaged over three independent runs to account for variability in constraint solver performance. Table 2 presents the complete library detection results across all benchmarks together with independent Frida validation status. For each benchmark, the number of expected libraries is reported, the number of libraries discovered by our module, the Frida validation outcome, and the loading mechanism employed. Based on these results, the module achieves 100 % recall and 100 % precision across all benchmarks. All benchmarks discover libraries that are confirmed through Frida dynamic instrumentation, providing independent verification of the symbolic analysis results.

Areas of Improvement. While the results are encouraging, the module is far from complete, because our benchmarks are synthetic. They mirror documented malware techniques, but real obfuscated binaries are complex and less predictable and will require testing against samples from virus repositories. Our module can flag obfuscation but makes no attempt to undo it. Reversing these transformations to recover the original program logic is a harder problem, and it is unclear how far Angr's

symbolic execution can be pushed in that direction without fundamental changes to the engine. Platform coverage is another constraint. The current implementation handles Linux ELF binaries on x86-64 and ARM64 reasonably well, and we do not support other OS. Taint tracking also has known blind spots. The engine follows explicit data flows but ignores implicit flows through control dependencies, which means precision degrades when execution passes through hash functions, compression routines, or cryptographic operations. Whether that integration is practical, and whether analysts would adopt it, remains an open question we intend to explore.

Conclusions. The research presented in this paper demonstrates the feasibility of recovering control flow graphs from binaries that rely on dynamically loaded code whose identity is determined only at runtime. By leveraging a symbolic execution engine and extending it with a two-level interception architecture, our module can resolve library targets that are encrypted, constructed on the stack, derived from network sources, or loaded through fileless mechanisms, and subsequently construct CFGs that reflect the true program structure. The evaluation on a suite of 16 benchmarks shows that the module achieves 100 % recall and 100 % precision for library detection across all tested scenarios. The module CFGs produced after analysis contain, on average, 29.8 % more nodes, 26.5 % more edges, and 41.6 % more functions than the corresponding static baselines, demonstrating an improvement in CFG completeness. All discoveries are independently validated through Frida-based dynamic instrumentation. At the same time, the work highlights limitations and directions for further development. Obfuscation patterns are detected but not reversed, and taint propagation does not yet capture implicit information flows. Future iterations of the system could address these gaps by integrating automatic deobfuscation, extending platform support to additional OS, and incorporating machine learning classifiers for novel evasion technique identification. Overall, our study delivers a working demonstration of how symbolic execution can be combined with comprehensive API interception to recover

Table 2 – Verification Results

Benchmark	Steps	Time, s	CFG Nodes		CFG Edges		Functions		Loaded Objects	
			Static	Module	Static	Module	Static	Module	Static	Module
simple_dlopen	20	0,21	67	101	73	106	37	57	5	7
environment_path	31	0,26	80	116	88	126	43	61	5	7
xor_encrypted	40	0,32	79	111	86	118	42	60	5	7
computed_path	33	0,26	84	115	93	124	44	61	5	7
multi_stage	20	0,25	77	151	91	164	37	81	5	9
stack_strings	22	0,25	72	101	78	109	39	54	5	7
time_triggered	33	0,29	75	104	85	116	39	54	5	7
anti_debug	48	0,32	112	141	130	161	53	68	5	7
memfd_create	26	0,34	136	165	158	189	67	82	5	7
indirect_call	36	0,26	73	102	88	119	34	49	5	7
multi_encoding	151	0,97	105	134	121	152	46	61	5	7
manual_elf_load	46	0,36	153	182	192	223	57	72	5	7
mmap_exec	49	0,37	119	152	144	177	50	69	5	7
rop_chain	71	0,40	99	131	118	151	47	65	5	7
signal_handler	71	0,41	114	176	138	202	53	87	5	9
network_socket	82	0,39	118	147	146	177	53	68	5	7

CFG edges that are invisible to static analysis. It not only validates the technical foundation of such an approach but also establishes a future research in binary analysis, malware detection, and software hardening can be built.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used Grammarly for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text. After using these tools, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

- Shoshitaishvili Y., Wang R., Salls C., Stephens N., Polino M., Dutcher A., Grosen J., Feng S., Hauser C., Kruegel C., Vigna G. SoK: (State of) The Art of War: Offensive Techniques in Binary Analysis. *IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P)*. 2016, pp. 138–157. DOI: 10.1109/SP.2016.17.
- Abadi M. Control-Flow Integrity Principles, Implementations, and Applications. *ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)*. 2009, vol. 13, no. 1, pp. 1–40. DOI: 10.1145/1609956.1609960.
- Zhang M., Sekar R. Control Flow Integrity for COTS Binaries. *USENIX Security Symposium*. 2013, pp. 337–352.
- Wang R., Shoshitaishvili Y., Bianchi A., Machiry A., Grosen J., Grosen P., Kruegel C., Vigna G. Ramblr: Making Reassembly Great Again. *Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*. 2017. DOI: 10.14722/NDSS.2017.23225.
- Anderson, H. S., Kharkar, A., Filar, B., Evans, D. and Roth, P. Learning to Evade Static PE Machine Learning Malware Models via Reinforcement Learning. *arXiv preprint*, arXiv:1801.08917. 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1801.08917.
- Pewny J., Garmany B., Gawlik R., Rossow C., Holz T. Cross-Architecture Bug Search in Binary Executables. *IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P)*. 2015, pp. 709–724. DOI: 10.1109/SP.2015.49.
- Hex-Rays. *IDA Pro: The Interactive Disassembler*. 2024. Available at: <https://hex-rays.com/ida-pro/> (accessed 30.11.2025).
- National Security Agency. *Ghidra: A Software Reverse Engineering Framework*. 2019. Available at: <https://ghidra-sre.org/> (accessed 30.11.2025).
- Luk C., Cohn R., Muth R., Patil H., Klauser A., Lowney G., Wallace S., Reddi V. J., Hazelwood K. Pin: Building Customized Program Analysis Tools with Dynamic Instrumentation. *ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*. 2005, pp. 190–200. DOI: 10.1145/1065010.1065034.
- Oleavy O. A. *Frida: A World-Class Dynamic Instrumentation Framework*. 2013. Available at: <https://frida.re> (accessed 30.11.2025).
- Chipounov V., Kuznetsov V., Candea G. S2E: A Platform for In-Vivo Multi-Path Analysis of Software Systems. *International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)*. 2011, pp. 265–278. DOI: 10.1145/1950365.1950396.
- IEEE. IEEE Standard for Information Technology-Portable Operating System Interface (POSIX®) Base Specifications, Issue 7. *IEEE Std 1003.1-2017*. IEEE/The Open Group, 2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8277153.
- Tool Interface Standard (TIS) Executable and Linking Format (ELF) Specification, Version 1.2*. TIS Committee, 1995. 83 p.
- De Moura L., Bjørner N. Z3: An Efficient SMT Solver. *International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS)*. Springer, 2008, pp. 337–340. DOI: 10.1007/978-3-540-78800-3_24.
- Nethercote N., Seward J. Valgrind: A Framework for Heavyweight Dynamic Binary Instrumentation. *ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI)*. ACM, 2007, pp. 89–100. DOI: 10.1145/1250734.1250746.
- Shacham H. The Geometry of Innocent Flesh on the Bone: Return-into-libc without Function Calls (on the x86). *ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS)*. ACM, 2007, pp. 552–561. DOI: 10.1145/1315245.1315313.
- Mostovyi O., DynPathResolver: Source Code and Experiment Available at: <https://github.com/smander/dynpathresolver> (accessed 31.02.2026).

Received 02.03.2026

Accepted 01.04.2026

Published 20.05.2026

УДК 004.415:004.423

О. С. МОСТОВИЙ, аспірант, відділ теорії цифрових автоматів № 100, Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, Київ, Україна; e-mail: alex@mostovyi.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6687-866X>

ВІДНОВЛЕННЯ ГРАФІВ ПОТОКУ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ДИНАМІЧНО ЗАВАНТАЖЕНОГО КОДУ ШЛЯХОМ СИМВОЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ БІБЛІОТЕК

Графи потоку керування є одним із ключових джерел даних як для статичного, так і для динамічного аналізу програмного забезпечення, оскільки саме вони відображають можливі шляхи виконання програми та слугують основою для виявлення вразливостей, верифікації поведінки й оцінки безпеки коду. Водночас захищене програмне забезпечення та сучасне шкідливе ПЗ дедалі активніше послуговуються механізмами динамічного завантаження коду й зв'язування під час виконання, що залишає невирішеними непрямі виклики та унеможливає повне статичне відновлення графів потоку керування. Як наслідок, залежності від зовнішніх бібліотек залишаються прихованими, а результати статичного аналізу – неповними, що суттєво обмежує можливості аналізу безпеки бінарних файлів. Для подолання зазначеного обмеження запропоновано метод аналізу, що поєднує символічне виконання зі спекулятивним попереднім завантаженням бібліотек для відновлення графів потоку керування з бінарних файлів, які використовують динамічне завантаження. Методологія ґрунтується на застосуванні спеціальних програмних перехоплювачів, що фіксують операції динамічного завантаження під час символічного виконання та інтегрують фактично завантажені бібліотеки безпосередньо у стан аналізу, завдяки чому раніше невирішені непрямі виклики отримують конкретні цілі переходу. Модуль реалізовано на основі дворівневої архітектури, яка забезпечує одночасне функціонування механізмів перехоплення функцій та відстеження інструкцій у єдиному середовищі символічного виконання. Принципова відмінність від інструментів динамічної інструментації полягає в тому, що аналіз проводиться цілком у символічному середовищі без фактичного запуску потенційно шкідливого коду, що робить підхід безпечним для дослідження зловмисного програмного забезпечення. Оцінку виконано на 16 синтетичних тестах, що охоплюють різноманітні техніки обфускації: зашифровані назви бібліотек, завантаження ініційоване мережею, шляхи, отримані зі змінних оточення, багатоступінчасті ланцюжки дешифрування, безфайлове виконання та ручний розбір виконуваних файлів і форматів зв'язування. За результатами експериментів зафіксовано приріст у середньому 29,8 % вузлів та 26,5 % ребер графів потоку керування порівняно з виключно статичним аналізом, а також досягнуто 100 % точності та 100 % повноти у виявленні динамічно завантажуваних бібліотек, що підтверджено перехресною валідацією за допомогою динамічної інструментації на основі Frida.

Ключові слова: бінарний аналіз, граф потоку керування, динамічне завантаження, символічне виконання, аналіз шкідливого програмного забезпечення.

Повне ім'я автора / Author's full name

Мостовий Олександр Сергійович / Mostovyi Oleksandr Serhiiovich

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.13
УДК 004.8:004.9

І. О. ЛЕЩИНЬСЬКА, кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryana.leshchynska@nure.ua

МЕТОД ВЕРИФІКАЦІЇ ЗБАЛАНСОВАНІСТІ МЕНТАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ РІШЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Предметом дослідження є процес верифікації ментальних моделей рішення інтелектуальної системи. Метою роботи є розробка підходу до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем щодо їх негативних та позитивних аспектів. Відповідно до цієї мети вирішуються такі основні задачі: розробити підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем на основі пропорційності подання негативних і позитивних характеристик у поясненні; розробити загальний метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи, який враховує структурне й вагове покриття множини негативних аспектів ментальними моделями рішення; провести експериментальну перевірку запропонованого методу на прикладі набору користувацьких відгуків про роботу рекомендаційної системи, що містять інформацію ментальні моделі запропонованих рішень. Запропоновано підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем з урахуванням негативних аспектів, який передбачає формування еталонної зваженої множини суттєвих негативних аспектів рішення, вилучення негативних елементів пояснення та розрахунок показників структурного і вагового покриття, а також оцінки пропорційності подання негативної інформації. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку, наскільки пояснення відображає обмеження та можливі негативні наслідки застосування рішення у співвідношенні до позитивних його властивостей. Запропоновано метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи. Метод включає етапи формування еталонної множини негативних аспектів рішення на основі аналізу користувацьких відгуків, вилучення негативної компоненти ментальних моделей рішення, обчислення показників структурного та вагового покриття в ментальних моделях, оцінювання пропорційності й релевантності подання негативних аспектів, формування інтегральної оцінки щодо збалансованості ментальних моделей. Метод забезпечує можливість уточнення ментальних моделей з урахуванням недоліків практичного застосування рішення користувача внаслідок неповноти моделей. Експериментальна перевірка методу на основі набору користувацьких відгуків показала, що використання відгуків як джерела інформації щодо ментальних моделей користувачів дає можливість сформувати еталонну множину негативних аспектів рішення інтелектуальної системи, яка відображає проблеми використання та ризики, важливі для користувачів.

Ключові слова: пояснення; система штучного інтелекту; зрозумілий штучний інтелект; залежності; ментальна модель; верифікація.

Вступ. Побудова пояснюваних інтелектуальних систем, які можуть надавати користувачам інтерпретовані тлумачення своїх рішень, є одним із актуальних напрямів досліджень у галузі штучного інтелекту [1]. При використанні цих рішень на практиці користувачі мають розуміти і враховувати як їх переваги, так і ризики, а також обмеження щодо можливостей застосування [2]. Однак значна частина існуючих підходів до побудови пояснень в інтелектуальних системах (ІС) орієнтована переважно на обґрунтування позитивних аспектів рекомендацій, тоді як негативні властивості рішень часто представлені фрагментарно або не відображаються у процесі взаємодії з користувачем [3]. Дане обмеження призводить до формування незбалансованих ментальних моделей рішень у користувачів, що, в свою чергу, знижує довіру до ІС та ускладнює практичне застосування отриманих результатів [4].

Ментальна модель рішення ІС представляє собою внутрішнє представлення сукупності причинно-наслідкових зв'язків між властивостями рішення, а також сценаріїв використання та обмежень, на основі якого формується пояснення щодо його корисності для користувача [4]. Якщо ментальна модель не містить або не повністю враховує суттєві негативні аспекти рішення ІС, то навіть обґрунтоване для користувача рішення може бути сприйняте як упереджене [5]. Тому важливим завданням в рамках пояснювального штучного інтелекту є розробка методів верифікації збалансованості ментальних моделей рішень інтелектуальних систем з урахуванням відображення негативних аспектів отриманого результату [6].

Негативні аспекти рішень мають прояви не лише на рівні внутрішніх ментальних моделей, але й, за результатами досвіду використання цих рішень користувачами, проявляються як відгуки, скарги, коментарі, а також позитивні й негативні оцінки [7]. Ці джерела інформації містять неформалізовані, фрагменти ментальних моделей користувачів, які відображають проблемні аспекти рішень, а також користувацьку інтерпретацію поведінки інтелектуальної системи [7]. Інтеграція результатів такого емпіричного зворотного зв'язку із формальними моделями рішень відкриває можливість верифікації відповідності ментальних моделей та реального досвіду користувачів. Невідповідність моделей і досвіду практичного застосування рішень свідчить про суттєві обмеження у процесі побудови пояснень в інтелектуальній системі, а також незбалансованість пояснення з урахування негативних аспектів рішення ІС [8].

Таким чином, перевірка збалансованості ментальних моделей рішення ІС має базуватись на формуванні базової множини суттєвих негативних аспектів рішення на основі, наприклад, аналізу корпусу користувацьких відгуків, з подальшою верифікацією ментальних моделей щодо покриття та пропорційності позитивних та негативних властивостей рішення [6, 8]. Таке співставлення дає можливість встановити можливу перевагу позитивних аспектів рішення у поточній ментальній моделі й невідповідність негативних аспектів тому представленню, яке формують користувачі у своїх ментальних моделях [8]. Як наслідок, можуть

© І. О. Лещинська, 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПИ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПИ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



бути виявлені і потім уточнені «сліпі зони» у ментальних моделях рішень інтелектуальних систем [6].

Таким чином, верифікація збалансованості ментальних моделей рішення ІС створює умови для адекватного використання цих рішень при вирішенні практичних задач користувачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження у сфері пояснюваного штучного інтелекту (ХАІ) приділяють значну увагу розробці методів локальної та глобальної інтерпретації моделей, таких як LIME, SHAP, а також атрибутивних підходів. Сукупність цих підходів дає можливість виявити найбільш важливі властивості або компоненти вхідних даних [9, 10], що підвищує прозорість моделей. Проте ці методи призначені для пояснення того, чому рішення ІС можуть бути застосовані на практиці. Оцінюванню того, наскільки повно відображені потенційні ризики, обмеження або негативні наслідки рішення ІС у вказаних методах і підходах не приділяється достатньо уваги [3, 10]. Тому поняття збалансованості пояснення зазвичай розглядається як неявне, що обмежує розробку критеріїв та процедур верифікації [6].

Дослідження щодо моделювання та аналізу ментальних моделей користувачів у системах підтримки прийняття рішень орієнтовані в першу чергу на виявлення способів формування внутрішнього представлення про роботу системи, її мету, можливі обмеження та очікувану поведінку [11, 12]. У таких дослідженнях ментальна модель розглядається у аспекті довіри з позиції прийняття або відхилення рішень системи, а також як об'єкт адаптації зі сторони системи, зокрема з використанням персоналізованих пояснень [11]. Проте питанням верифікації збалансованості ментальних моделей не приділяється достатньо уваги [6].

В рамках побудови пояснень в ІС суттєвого розвитку набули нейросимвольні підходи. Особливість таких підходів полягає у поєднанні нейронних мереж із символьним представленнями знань у вигляді логічних правил, онтологій або ж графових структур та сценарних моделей. Таке поєднання створює умови для підвищення прозорості роботи інтелектуальних систем [13, 14]. Водночас навіть у межах нейросимвольних систем основна увага часто зосереджується на правильності та повноті знань, узгодженості логічних правил чи відповідності онтологічних зв'язків, тоді як досягненню балансу між позитивними та негативними аспектами рішень не приділяється достатньо уваги [6, 14].

Використання відгуків користувачів, оцінок та коментарів як джерела знань про реальний досвід взаємодії з інтелектуальними системами розглядається в [7, 15]. Аналіз тональності та тематики відгуків дає можливість виявити позитивні й негативні сторони продуктів та сервісів, що дозволяє формувати профілі якості та задоволеності користувачів [15]. Однак такі емпіричні дані зазвичай не використовуються для виявлення відмінностей між внутрішніми моделями системи та ментальними моделями користувачів [6, 8, 15].

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що проблема верифікації збалансованості ментальних моделей рішень інтелектуальних систем з урахуванням негативних аспектів на основі

аналізу даних з користувацьких відгуків потребує свого вирішення. Це обумовлює актуальність даного дослідження.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка підходу до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем щодо їх негативних та позитивних аспектів.

Відповідно до цієї мети вирішуються такі основні задачі:

- розробити підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем на основі пропорційності подання негативних і позитивних характеристик у поясненні;

- розробити загальний метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи, який враховує структурне й вагове покриття множини негативних аспектів ментальними моделями рішення;

- провести експериментальну перевірку запропонованого методу на прикладі набору користувацьких відгуків про роботу рекомендаційної системи, що містять інформацію ментальні моделі запропонованих рішень.

Підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем.

Підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем щодо негативних аспектів визначає критерії та процедуру оцінювання для одного пояснення. Підхід включає чотири кроки: формування еталонної множини негативних аспектів рішення; вилучення негативних аспектів рішення із пояснення; обчислення показників покриття та пропорційності; формування інтегральної оцінка збалансованості пояснення.

На першому кроці формується множина суттєвих негативних аспектів рішення, яка використовується для оцінювання конкретних пояснень. Джерелами для побудови цієї множини є набір даних про досвід використання рішення користувачами, наприклад, текстові відгуки. Із даного набору виділяються суттєві (зазвичай повторювані) негативні фактори, які впливають на експлуатацію рішення. Для кожного негативного аспекту задається нормована вага, яка відображає його значущість для застосування рішення. Зокрема, суттєві збої мають більшу вагу, ніж недовліки інтерфейсу. Наприклад, для телефона такими негативними аспектами можуть бути реальна сміливість та автономність акумуляторної батареї, відсутність гарантії, перегрів корпусу, дискомфорт від екрана, проблемами з авторизацією та конфіденційністю.

Другий крок розробленого підходу пов'язаний із аналізом конкретного пояснення щодо рішення ІС. Із тексту пояснення виділяється множина негативних елементів, які в явній або неявній формі описують недовліки, небажані наслідки застосування або обмеження даного рішення. При вилученні ознак фактично формується відображення пояснення як упорядкованої множини властивостей рішення на множину негативних аспектів. Кожен елемент пояснення, який містить опис певної проблеми, відображається на один чи кілька елементів еталонної множини негативних

аспекті. Якщо пояснення містить конкретний опис, наприклад, згадку про швидкий розряд батареї, перегрів або можливі помилки авторизації, то відповідні аспекти вважаються покритими поясненням. В іншому випадку відсутні у поясненні суттєві негативні аспекти фіксують.

На третьому кроці виконується в обчислення показників структурного і вагового покриття, які відображають, наскільки повно й адекватно пояснення покриває еталонну множину негативних аспектів.

Коефіцієнт структурного покриття $C_{\text{struct}}^{\text{neg}}$ характеризує частку L^{neg} еталонних негативних аспектів L^{etalon} , представлених у поясненні:

$$C_{\text{struct}}^{\text{neg}} = \frac{|L^{\text{neg}}|}{|L^{\text{etalon}}|}. \quad (1)$$

Значення $C_{\text{struct}}^{\text{neg}}$, близькі до 1, свідчать про те, що пояснення містить більшість суттєвих негативних аспектів. Низькі значення вказують про замовчування частини проблем, тобто про структурну незбалансованість пояснення.

Коефіцієнт вагового покриття відображає частку сумарної ваги негативних аспектів l_i , яку перекриває пояснення:

$$C_{\text{weight}}^{\text{neg}} = \frac{\sum_{l_i \in L^{\text{neg}}} w(l_i)}{\sum_{l_i \in L^{\text{etalon}}} w(l_i)}, \quad (2)$$

де $w(l_i)$ – вага негативного аспекту.

Даний показник враховує в першу чергу найбільш значущі аспекти з високою вагою.

Збалансованості пояснення крім показників (1) та (2) важливими є значення пропорційності та релевантності подання негативних аспектів.

Пропорційність означає, що негативні аспекти не лише згадуються, але й займають у поясненні таку частку змісту, яка відповідає їхній значущості порівняно з позитивними властивостями рішення. Тобто якщо важливий негативний аспект згаданий коротко на фоні великого позитивного опису, то це свідчить про непропорційне відображення даного аспекту.

Релевантність означає, що формулювання негативних аспектів повинні відповідати рівню підготовки та інформаційним потребам користувачів. Тобто складні аспекти рішення мають бути представлені у спрощеній формі для кінцевого користувача, або детально для експерта у предметній галузі.

Пропорційність і релевантність оцінюються за експертними шкалами або на основі таких критеріїв, як:

- відсоток тексту пояснення, присвячений негативним аспектам;
- відсоток тексту пояснення для користувачів з відповідним рівнем знань;
- використання/відсутність відповідної термінології.

Результати попередніх етапів об'єднуються у інтегральну оцінку збалансованості пояснення щодо негативних аспектів. Така оцінка може бути представлена згорткою коефіцієнта структурного та вагового покриття, а також пропорційності й релевантності, або ж визначенням порогових значень цих показників.

Метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи.

Метод призначений для перевірки узгодженості ментальних моделей з еталонною множиною негативних аспектів рішення.

Метод містить такі етапи.

Етап 1. Формування еталонної множини негативних аспектів рішення.

Результуюча множина L^{etalon} має вигляд:

$$L^{\text{etalon}} = \{(l_i, w(l_i)) : i = \overline{1, I}\}. \quad (3)$$

Етап 2. Виділення негативної компоненти з ментальних моделей рішення.

Інтелектуальна система може мати кілька ментальних моделей $Mm^{(n)}$ для одного рішення, в залежності від рівня знань користувача та різних варіантів практичного використання.

Для кожної ментальної моделі проводиться:

- структурний аналіз з метою ідентифікувати елементи, що відповідають негативним властивостям рішення;
- зіставлення отриманих елементів з негативними аспектами з L^{etalon} .

У результаті для кожної моделі $Mm^{(n)}$ формується підмножина $L^{Mm^{(n)}} \subseteq L^{\text{etalon}}$, яка містить ті негативні аспекти з L^{etalon} , що присутні у відповідній ментальній моделі рішення.

Етап 3. Обчислення показників покриття негативних аспектів ментальними моделями.

На третьому етапі для кожної ментальної моделі обчислюються коефіцієнт структурного покриття та коефіцієнт вагового покриття.

Етап 4. Оцінка пропорційності подання негативних аспектів у ментальних моделях.

Навіть за високих значень структурного та вагового покриття ментальна модель може бути незбалансованою у випадку негативні аспекти представлені у мінімальному вигляді на фоні детальної позитивної частини моделі.

Тому для кожної ментальної моделі рішення визначається:

- відсоток структурних елементів, пов'язаних із негативними аспектами;
- співвідношення між деталізацією негативних та позитивних аспектів, зокрема враховується чи мають негативні аспекти однаковий рівень формалізації у порівнянні з позитивними аспектами (умови та сценарії використання тощо);
- наявність обмежень щодо негативних аспектів, наприклад, захисних дій, попереджень тощо.

Етап 5. Оцінка релевантності негативних аспектів до профілю користувачів.

Ментальна модель на даному етапі оцінюється з позиції, наскільки її негативна компонента відповідає профілю цільових користувачів, для яких призначені пояснення.

Для кожного рівня ментальної моделі (рівня підготовки користувача) аналізується:

– подано негативні аспекти у зрозумілій для відповідної аудиторії формі, чи навпаки форма не відповідає рівню знань користувача;

– представлено складні або критичні ризики застосування рішення, чи навпаки дані ризики закамуфльовані довгими технічними описами.

Результатом етапу є оцінка релевантності представлення негативних аспектів у кожній ментальній моделі відповідно до профілю користувача. Низьке значення релевантності може свідчити про важливість адаптації ментальної моделі, зокрема її спрощення для користувачів з низьким рівнем підготовки.

Етап 6. Формування інтегральної оцінки збалансованості ментальних моделей.

Виконується згортка результатів попередніх етапів у єдиний інтегральний показник.

Додатково може виконуватися інтеграція показників для всіх ментальних моделей $Mm^{(n)}$ з метою оцінки загальної збалансованості ментального представлення користувачів щодо рішення інтелектуальної системи.

Експериментальна перевірка розробленого методу.

Перевірка виконана з використанням множини текстових відгуків про рекомендовану в системі електронної комерції модель смартфона. Відгуки розміщені покупцями на сайті системи електронної комерції і містять як позитивні характеристики, так і опис типових проблем та негативних вражень. Така множина може бути інтерпретована як сукупність фрагментів індивідуальних ментальних моделей користувачів, які відображають їхнє суб'єктивне сприйняття властивостей продукту та якості пов'язаного з цим продуктом сервісу.

На першому етапі експерименту набір відгуків було проаналізовано з метою виділення еталонної множини ключових негативних аспектів продукту та сервісу. На основі узагальнення критичних відгуків було сформовано еталонну множину негативних аспектів з десяти елементів (корпоративне блокування, фактична ємність батареї, швидкий розряд, проблеми з гарантією, перегрів, дискомфорт від екрана/ШІМ, глюки/повільна робота, проблеми з авторизацією, конфіденційність, неякісні аксесуари). Кожному аспекту було призначено вагу у діапазоні від 0,5 до 0,99. Вага відображає відносну важливість недоліка для користувача. Наприклад, корпоративне блокування та критичні проблеми з батареєю оцінювалися як більш значущі, ніж недоліки пливки.

На другому етапі було змодельовано три варіанти ментальної моделі рішення системи, які по-різному відображають еталонну множину негативних аспектів:

– модель M1, збалансована ментальна модель, що включає всі 10 негативних елементів потенційно здатна враховувати весь спектр негативних аспектів, відображених у користувацьких відгуках;

– модель M2, частково збалансована модель, яка охоплює приблизно половину еталонних негативних аспектів і включає найкритичніші властивості (корпоративне блокування, проблеми з ємністю батареї та автономністю, питання гарантії, перегрів);

– модель M3, незбалансована модель, яка враховує лише один із еталонних негативних аспектів (швидкий розряд батареї) та ігнорує інші суттєві проблеми, описані користувачами.

На третьому етапі для трьох ментальних моделей M1, M2, M3 було розраховано показники структурного покриття та вагової відповідності. Результати етапу наведено в табл. 1. Як видно з табл. 1, модель M1 покриває всі негативні аспекти з відгуків як за кількістю, так і за сумарною вагою. Модель M2 демонструє покриття близько 50 % аспектів за кількістю та приблизно 56 % за сумарною вагою цих аспектів, тобто враховує головні і ігнорує другорядні недоліки. Модель M3 має низькі показники як за структурним, так і за ваговим покриттям (близько 11–13 %), що відображає суттєвий розрив між ментальною моделлю рішення системи та сприйняттям цього рішення користувачами.

Розроблені підхід та метод забезпечують можливість автоматизації процесу верифікації ментальних моделей рішень рекомендаційних систем на основі зворотного зв'язку від користувачів.

Якщо ментальна модель не містить частину негативних аспектів, які регулярно фіксуються у відгуках споживачів, то це означає подальше зниження довіри користувачів, оскільки вони не отримують отримувати повну інформацію про ризики використання рішення.

Таблиця 1 – Показники ментальних моделей

Модель	Коефіцієнт структурного покриття	Коефіцієнт вагового покриття
M1 – збалансована	1,00	1,00
M2 – частково збалансована	0,51	0,56
M3 – незбалансована	0,11	0,13

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення експерименту на кілька різнорідних продуктів і доменів, поєднання автоматизованого семантичного аналізу відгуків із формальним виділенням ментальних моделей користувачів.

Висновки. Запропоновано підхід до оцінювання збалансованості пояснень рішень інтелектуальних систем з урахуванням негативних аспектів, який передбачає формування еталонної зваженої множини суттєвих негативних аспектів рішення, вилучення негативних елементів пояснення та розрахунок показників структурного і вагового покриття, а також оцінки пропорційності подання негативної інформації. Такий підхід дозволяє отримати кількісну оцінку, наскільки пояснення відображає обмеження та можливі негативні наслідки застосування рішення у співвідношенні до позитивних його властивостей.

Запропоновано метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи. Метод включає етапи формування еталонної множини негативних аспектів рішення на основі аналізу користувацьких відгуків,

вилучення негативної компоненти ментальних моделей рішення, обчислення показників структурного та вагового покриття, оцінювання пропорційності й релевантності подання негативних аспектів, формування інтегральної оцінки щодо збалансованості ментальних моделей.

Метод забезпечує можливість уточнення ментальних моделей з урахуванням недоліків практичного застосування рішення користувача внаслідок неповноти моделей.

Експериментальна перевірка методу на основі набору користувацьких відгуків показала, що використання відгуків як джерела інформації щодо ментальних моделей користувачів дає можливість сформувати еталонну множину негативних аспектів рішення інтелектуальної системи, яка відображає проблеми використання та ризики, важливі для користувачів.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при написанні тексту цієї роботи.

References

- Goyal P., Ferrara E. Graph embedding techniques, applications, and performance: A survey. *Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 151, pp. 78–94. DOI: 10.1016/j.knsys.2018.03.022.
- Brown D. E. Introduction to data mining for medical informatics. *Clinics in Laboratory Medicine*, 2008, vol. 28, no. 1, pp. 17–26. DOI: 10.1016/j.cl.2007.10.005.
- Guidotti R., Monreale A., Ruggieri S., Turini F., Giannotti F., Pedreschi D. A survey of methods for explaining black box models. *ACM Computing Surveys*, 2019, vol. 51, no. 5, art. 93. DOI: 10.1145/3236009.
- Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*, 2019, vol. 267, pp. 1–38. DOI: 10.1016/j.artint.2018.07.007.
- Doshi-Velez F., Kortz M., Budish R. et al. Accountability of AI under the law: The role of explanation. *arXiv preprint*, 2017, arXiv:1711.01134.
- Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. “Why should I trust you?” Explaining the predictions of any classifier. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. San Francisco, 2016, pp. 1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.
- Zhang Y., Chen X. Explainable recommendation: A survey and new perspectives. *Foundations and Trends in Information Retrieval*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 1–101. DOI: 10.1561/15000000066.
- Tintarev N., Masthoff J. Explaining recommendations: Design and evaluation. In: *Recommender Systems Handbook*, 2nd ed. Boston, Springer, 2015, pp. 353–382. DOI: 10.1007/978-1-4899-7637-6_10.
- Lundberg S. M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. Long Beach, 2017, pp. 4765–4774.
- Samek W., Montavon G., Vedaldi A., Hansen L. K., Müller K.-R., eds. *Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning*. Cham, Springer, 2019. 433 p. DOI: 10.1007/978-3-030-28954-6.
- Kulesza T., Stumpf S., Wong W.-K. et al. Explanatory debugging: Supporting end-user debugging of machine-learned programs. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC)*. Pittsburgh, 2011, pp. 41–48. DOI: 10.1109/VLHCC.2011.6070395.
- Eiband M., Schneider H., Bilandzic M., Fazekas-Con Z., Haug M., Hussmann H. Bringing transparency design into practice: User interfaces for explainable AI. In: *Proceedings of the 2018 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'18 Workshop on Explainable Smart Systems)*. Montreal, 2018.
- Garcez A. d'Avila, Besold T. R., De Raedt L. et al. Neural-symbolic learning and reasoning: A survey and interpretation. *Neurocomputing*, 2019, vol. 339, pp. 3–13. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.01.034.
- Besold T. R., d'Avila Garcez A., Bader S. et al. Neural-symbolic learning and reasoning: Contributions and challenges. In: *Proceedings of the AAI Spring Symposium on Knowledge Representation and Reasoning: Integrating Symbolic and Neural Approaches*. Stanford, 2017.
- Zhang L., Wang S., Liu B. Deep learning for sentiment analysis: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2018, vol. 8, no. 4, e1253. DOI: 10.1002/widm.1253.

Надійшла (received) 17.03.2026

Прийнята (accepted) 10.04.2026

Оприлюднена (published) 20.05.2026

UDC 004.8:004.9

I. O. LESHCHYNSKA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryana.leshchynska@nure.ua

METHOD FOR VERIFYING THE BALANCE OF MENTAL MODELS OF AN INTELLIGENT SYSTEM'S DECISION

The subject of the study is the process of verifying mental models of an intelligent system's decision. The aim of the work is to develop an approach for assessing the balance of explanations of intelligent systems' decisions with respect to their negative and positive aspects. In accordance with this aim, the following main tasks are addressed: to develop an approach to assessing the balance of explanations of intelligent systems' decisions based on the proportional representation of negative and positive characteristics in an explanation; to develop a general method for verifying the balance of mental models of an intelligent system's decision that takes into account the structural and weighted coverage of the set of negative aspects by the decision's mental models; to carry out an experimental evaluation of the proposed method using a set of user reviews of the operation of a recommender system that contain information about mental models of the proposed decisions. An approach to assessing the balance of explanations of intelligent systems' decisions that accounts for negative aspects is proposed. The approach involves constructing a reference weighted set of essential negative aspects of a decision, extracting negative elements of the explanation, computing indicators of structural and weighted coverage, and assessing the proportionality of the presentation of negative information. This approach provides a quantitative estimate of the extent to which an explanation reflects the limitations and potential negative consequences of applying a decision in relation to its positive properties. A method for verifying the balance of mental models of an intelligent system's decision is proposed. The method includes the stages of constructing a reference set of negative aspects of a decision based on the analysis of user reviews, extracting the negative component of the decision's mental models, computing indicators of structural and weighted coverage, assessing the proportionality and relevance of the presentation of negative aspects, and forming an integral measure of the balance of mental models. The method enables refinement of a mental model taking into account shortcomings of the practical application of a decision by the user that arise due to incompleteness of the models. Experimental evaluation of the method based on a set of user reviews has shown that using reviews as a source of information about users' mental models makes it possible to construct a reference set of negative aspects of an intelligent system's decision that reflects usage problems and risks important to users.

Keywords: explanation; artificial intelligence system; explainable artificial intelligence; dependencies; mental model; verification.

Повне ім'я автора / Author's full name

Автор 1 / Author 1: Ліщинська Ірина Олександрівна / Leshchynska Irina Oleksandrivna

M. A. GRINCHENKO, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Project Management In Information Technologies, Kharkiv, Ukraine, e-mail: marina.grynchenko@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8383-2675>

D. O. KUTSENKO, graduate student of the Department of Project Management In Information Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Dmytro.O.Kutsenko@cs.khpi.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-6359-3143>

COMPARATIVE STUDY OF TRANSFORMER-BASED AND INTELLIGENT DOCUMENT ANALYSIS METHODS FOR AUTOMATED EXTRACTION OF MEDICAL DATA FROM PDF DOCUMENTS

This paper presents a study on automated processing of medical laboratory reports in PDF format, with a focus on text recognition and structured information extraction. The research investigates the effectiveness of different approaches to optical character recognition (OCR), including classical methods and transformer-based models, as well as techniques for extracting key medical data from unstructured and semi-structured text. A comparative experimental analysis was conducted using medical documents with different structural characteristics, including tabular and text-based formats. The study evaluates the performance of OCR methods and extraction pipelines using a set of quantitative metrics, including Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), Exact Match (EM), Precision, Recall, and F1-score. The obtained results demonstrate that OCR accuracy alone does not guarantee high-quality structured data extraction, as recognition errors significantly affect downstream processing and reduce the reliability of extracted information. Special attention is given to layout-aware approaches that utilize the structural properties of PDF documents. The proposed method based on direct text extraction using pdfplumber shows superior performance by preserving spatial relationships between document elements and eliminating the need for OCR in documents with an embedded text layer. This approach ensures higher stability and accuracy when processing structured medical data. The findings highlight that the main challenge in processing medical documents lies in the extraction stage rather than in text recognition. The study demonstrates the importance of integrating layout-aware and intelligent extraction methods for improving the reliability, robustness, and scalability of automated data processing systems. The proposed approach can be used as a foundation for developing medical information systems and decision support tools aimed at efficient and accurate clinical data management.

Keywords: optical character recognition, information extraction, medical documents, medical data processing, layout-aware methods, data extraction, document analysis, decision support systems, artificial intelligence tools.

Introduction. In the context of the rapid digitalization of healthcare systems, the efficient processing of medical documentation has become a critical task for modern medical institutions. Laboratory test results represent an essential component of clinical information and are widely used for diagnosis, treatment planning, and monitoring of patient conditions. In practice, such results are often distributed in the form of PDF documents, which are convenient for human reading but difficult to process automatically due to their unstructured or semi-structured nature.

The increasing volume of medical data and the need for its integration into clinical information systems and decision support tools significantly intensify the demand for automated document analysis methods. Manual data entry remains a common practice; however, it is time-consuming, error-prone, and does not scale efficiently in real-world healthcare environments. Additionally, the absence of standardized formats for laboratory reports leads to substantial variability in document structure, layout, and content representation, which further complicates automated processing.

Recent advances in the field of intelligent document processing, including optical character recognition (OCR) and machine learning-based information extraction methods, have opened new opportunities for addressing these challenges. In particular, transformer-based models have demonstrated high performance in text recognition tasks, while layout-aware approaches enable the incorporation of spatial information into document understanding. At the same time, traditional rule-based extraction methods

remain widely used due to their simplicity and interpretability, despite their limited ability to generalize across heterogeneous document formats.

In this context, the problem of automated extraction of structured data from medical PDF documents requires a comprehensive analysis of different methodological approaches. It is important to evaluate not only the quality of text recognition but also the impact of OCR output on subsequent information extraction stages. Therefore, the present study focuses on the comparative analysis of transformer-based OCR methods, classical recognition approaches, and layout-aware document analysis techniques for the automated processing of medical laboratory documents.

Analysis of research and publications. Recent studies indicate that automated processing of medical documentation is increasingly approached as an integration of natural language processing, optical character recognition, and intelligent information extraction methods. In the review by Patil and Golbhavi [1], healthcare NLP is described as a rapidly evolving field that has moved from symbolic and statistical methods toward deep learning and transformer-based architectures. Similar conclusions are presented in [14], where transformer-based NLP techniques are shown to improve the extraction of clinically relevant entities and the analysis of unstructured medical text. The strategic role of NLP in medical documentation is also emphasized in [19].

A substantial body of research focuses on Named Entity Recognition as a core mechanism for transforming unstructured medical text into structured data. In [4], the

© Grinchenko M.A., Kutsenko D. O., 2026



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the journal *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. This article is distributed under the [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) international license. **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



authors show that transformer-based NER models consistently outperform traditional rule-based and statistical approaches in healthcare text processing. In [5], a BERT-based end-to-end framework for NER and relation extraction in electronic medical records is proposed, while [6] presents a hybrid BiLSTM-BERT-RAG architecture for medical NER and classification. Additional evidence of the effectiveness of transformer-based models for heterogeneous medical records is reported in [25]. Together, these studies confirm the strong potential of neural approaches for extracting semantically meaningful entities from medical documentation.

Another important research direction concerns multilingual and low-resource clinical information extraction. In [3], prompt-based large language models are applied to multilingual biomedical NER and entity linking, demonstrating strong performance even with limited annotated resources. This issue is particularly relevant for non-English medical documentation, including Ukrainian-language healthcare texts. At the same time, studies such as [2] indicate that even open large language models with limited computational requirements can provide practically usable medical text generation and documentation support.

Significant attention is also given to direct extraction of information from medical reports containing complex layouts, tables, numerical values, units, and reference ranges. In [7], an end-to-end OCR and information extraction pipeline is proposed for laboratory reports, combining line normalization, NER, and multicolumn analysis. In [8], OCR-induced noise in medical records is analyzed in detail, and hybrid approaches combining deterministic rules with contextual neural models are presented as a more robust alternative to purely rule-based systems. Similar applied solutions that combine OCR with image preprocessing and structured extraction are reported in [18] and [20], confirming the practical importance of OCR-based digitization in healthcare workflows.

Recent research trends demonstrate a shift toward integrated and multimodal document analysis systems. In [9], a multi-engine OCR framework is proposed for heterogeneous medical documents, while [11] presents a multimodal architecture integrating OCR, formatting, and AI-based interpretation. The study in [12] investigates multimodal large language models for digitizing and interpreting handwritten and printed medical reports, and [16] explores hybrid vision-language models for surgical documentation. Related developments in automatic summarization and document generation for healthcare applications are described in [17] and [21]. These works suggest that medical document processing is increasingly moving beyond isolated OCR toward end-to-end intelligent documentation systems.

Another growing line of research concerns the use of large language models for extracting, validating, and structuring clinical information. In [23], LLMs are applied to extract key parameters and detect inconsistencies in clinical trial documentation, including Ukrainian-language data. In [24], a scalable LLM-based framework is proposed for validated extraction of structured data from electronic health records, combining preprocessing, parsing, embedding-based retrieval, entity extraction, and mapping

to healthcare interoperability standards. These results demonstrate the practical potential of LLM-based pipelines for structured medical data generation and validation.

In parallel, studies on OCR post-correction and robustness provide further insight into the limitations of purely text-based pipelines. In [15], the authors demonstrate that neural models for OCR error correction can significantly improve digitized text quality when trained on domain-relevant patterns and error distributions. Although the study is not focused on medical documentation, it highlights an important methodological point that is also relevant in healthcare document processing: OCR quality alone does not guarantee reliable structured data extraction, especially when downstream methods are sensitive to formatting variations and token-level distortions

Overall, the analysis of existing studies shows that automated medical document processing is a multidimensional problem requiring the integration of OCR, information extraction, semantic modeling, and document layout analysis. Existing research demonstrates significant progress in transformer-based NLP and NER [1], [4]–[6], multilingual biomedical processing [3], [23], OCR-based and hybrid extraction approaches [7], [8], [18], [20], multimodal document analysis [9], [11], [12], [16], and large language model-based methods for structured data extraction and validation [2], [13], [17], [21], [24], [25]. Additional studies highlight the importance of NLP in healthcare documentation and the impact of deep learning on medical data processing [14], [19], [22]. At the same time, there remains a practical and methodological gap in comparative studies focused specifically on medical laboratory PDF documents, particularly in evaluating OCR-based pipelines against layout-aware approaches for extracting structured numerical results, units, and reference ranges. This gap determines the relevance of the present study.

Aim and tasks of the study. The aim of this study is to develop and evaluate an approach for improving the automated extraction of structured information from medical PDF documents by applying transformer-based OCR models and intelligent document analysis methods under conditions of heterogeneous document formats. In the authors previous work, a conceptual and functional model of medical center business processes was developed, focusing on the digitalization of laboratory test results and the formalization of service delivery processes for the design of an intelligent data analysis information system [26]. This prior research provided a methodological foundation for identifying key processes requiring automation and highlighted the importance of structured data extraction as a critical component of the overall system.

To achieve this aim, the following tasks are defined:

- to analyze the characteristics of medical laboratory PDF documents and identify key challenges in their automated processing;
- to implement and compare different text recognition approaches, including classical OCR and transformer-based models;
- to develop and apply baseline rule-based methods for structured data extraction;

- to implement a layout-aware extraction approach using positional information from PDF documents;
- to evaluate the quality of the proposed approaches using a set of metrics for both text recognition and information extraction;
- to analyze the impact of OCR output on the accuracy of structured data extraction and determine the most effective approach for practical application.

Materials and model. Document Processing Pipeline. The processing of medical laboratory reports is implemented as a multi-stage pipeline that reflects the sequential transformation of unstructured document data into structured, machine-readable information. The general workflow of the proposed pipeline is illustrated in Fig. 1.

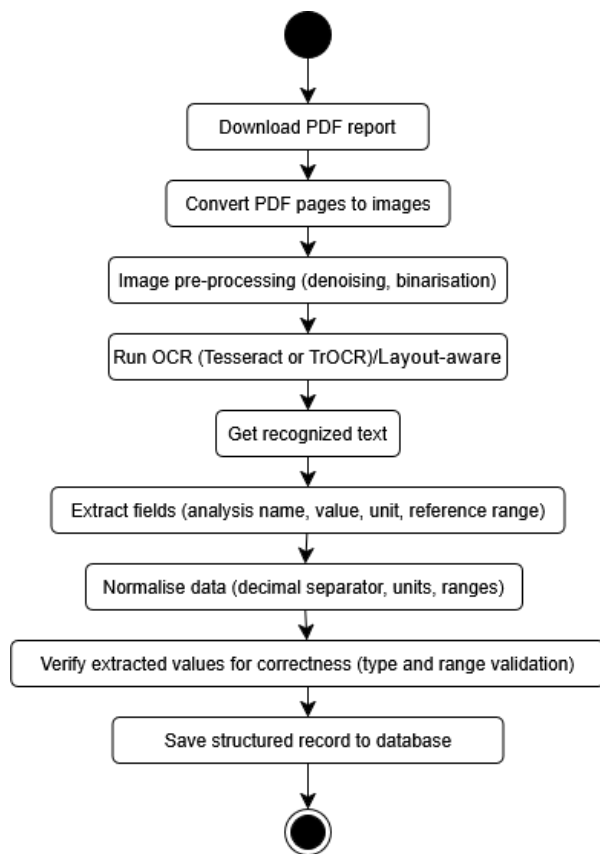


Fig. 1. General workflow of medical document processing pipeline

The proposed approach is based on the decomposition of the overall task into independent functional stages, which allows for flexible modification, replacement, and optimization of individual components without affecting the entire system. At the initial stage, PDF documents containing laboratory test results are converted into raster images to ensure compatibility with image-based text recognition methods. Given the variability in document quality, including noise, compression artifacts, and differences in scanning resolution, an image preprocessing step is applied. This stage includes noise reduction and adaptive binarization, which improve the contrast between text and background and enhance the performance of subsequent recognition algorithms.

Following preprocessing, optical character recognition is performed using selected OCR models. In

this study, both classical and transformer-based approaches are considered, enabling a comparative analysis of their effectiveness in processing medical documents. The output of this stage is unstructured textual data, which may contain recognition errors, formatting inconsistencies, and disrupted logical relationships between document elements.

The next stage focuses on the extraction of structured information from the recognized text. This involves identifying key fields such as the test name, measured value, measurement units, and reference ranges. The extraction process is particularly challenging due to the tabular nature of laboratory reports and the close spatial relationship between textual and numerical data.

To ensure consistency and correctness, the extracted data undergo normalization, including standardization of decimal separators, measurement units, and value ranges. Additionally, validation procedures are applied to verify the correctness of extracted values based on expected data types and medically plausible ranges.

The final stage of the pipeline involves storing the validated structured data in a database, making it available for further analysis and integration into clinical information systems.

It is important to emphasize that optical character recognition represents only an intermediate stage of the overall process and does not guarantee the correctness of the final structured output. The experimental results demonstrate that the quality of extracted information depends not only on the accuracy of text recognition but also, to a greater extent, on the effectiveness of the extraction method and the ability to account for the structural characteristics of medical documents.

Evaluation Metrics. To evaluate the performance of the proposed approaches, a set of metrics was used to assess both the quality of text recognition and the accuracy of structured data extraction. The evaluation process considers errors at different levels, including character-level discrepancies, word-level distortions, and the correctness of extracted structured fields.

The quality of optical character recognition is measured using the Character Error Rate (CER), which reflects the proportion of incorrectly recognized characters relative to the reference text. This metric is defined as the normalized Levenshtein distance between the predicted and reference strings:

$$CER = D(pred, ref) / |ref|, \quad (1)$$

where $D(pred, ref)$ denotes the Levenshtein distance, and $|ref|$ is the length of the reference text.

In addition to CER, the Word Error Rate (WER) is used to evaluate recognition quality at the word level. This metric captures structural distortions in the text and is particularly sensitive to word order and segmentation errors:

$$WER = (S + D + I) / N, \quad (2)$$

where S represents substitutions, D denotes deletions, I corresponds to insertions, and N is the total number of words in the reference text.

To assess the correctness of structured data extraction, the Exact Match (EM) metric is applied. This metric

evaluates whether all required fields are extracted without any errors and is defined as a binary indicator:

$$EM = [\text{if all fields are correctly extracted}], \quad (3)$$

Furthermore, the evaluation includes standard classification metrics such as Precision and Recall, which measure the correctness and completeness of extracted fields. Precision reflects the proportion of correctly extracted fields among all predicted fields:

$$\text{Precision} = TP / (TP + FP), \quad (4)$$

where TP denotes true positives and FP represents false positives.

Recall, in turn, measures the proportion of correctly identified fields relative to all relevant fields in the reference data:

$$\text{Recall} = TP / (TP + FN), \quad (5)$$

where FN corresponds to false negatives.

To provide a balanced assessment of extraction performance, the F_1 -score is used as a harmonic mean of *Precision* and *Recall*:

$$F_1 = 2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall}). \quad (6)$$

Finally, for numerical fields such as measured values and reference ranges, the relative error is calculated to quantify the deviation between predicted and true values:

$$\text{Error} = |x_{pred} - x_{true}| / |x_{true}|. \quad (7)$$

This metric is particularly important in the medical domain, where even small numerical inaccuracies may significantly affect the interpretation of laboratory results.

The combination of these metrics enables a comprehensive evaluation of both recognition quality and extraction accuracy, providing a detailed understanding of the strengths and limitations of the analyzed approaches.

Experimental Setup. The experimental study was designed to evaluate the effectiveness of different approaches to text recognition and structured information extraction from medical laboratory PDF documents. The experimental workflow includes the preparation of input data, application of alternative OCR methods, extraction of structured fields, and evaluation of results using a set of predefined metrics.

The experimental study was conducted to evaluate the effectiveness of different approaches to text recognition and structured data extraction from medical laboratory PDF documents. A set of documents was selected, and reference data were manually created to serve as ground truth for objective comparison.

Two pipelines were implemented using classical (Tesseract) and transformer-based (TrOCR) OCR methods. The recognized text was processed with a rule-based extraction module to identify key fields, including test names, values, units, and reference ranges.

The performance was evaluated using CER and WER for text recognition, and Exact Match, Precision, Recall, F_1 -score, and relative error for structured data extraction. The results were aggregated into a comparative table to enable systematic analysis of the approaches.

The interaction between system components during document processing is represented using a sequence diagram, shown in Fig. 2.

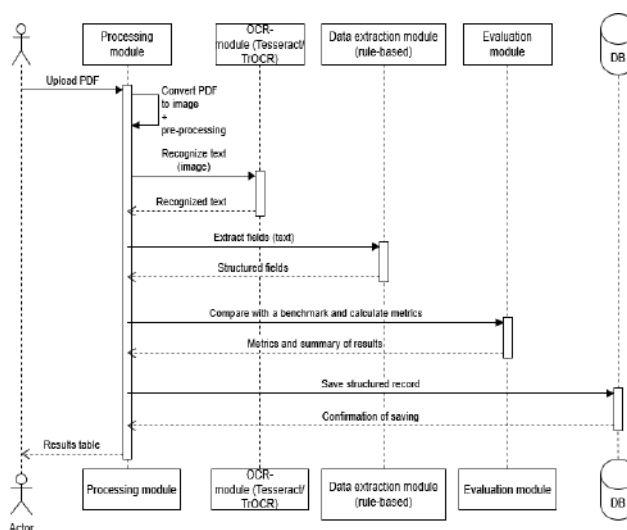


Fig. 2. Sequence diagram of document processing and evaluation pipeline

This diagram provides a detailed view of the data flow between the processing module, OCR module, extraction module, evaluation module, and database. It demonstrates how the input document is sequentially transformed into structured data and how evaluation results are generated and stored.

Such a representation allows for a clearer understanding of the system architecture and emphasizes the modular nature of the proposed approach. In particular, it illustrates that each component of the pipeline operates as an independent functional unit, which facilitates scalability, maintainability, and the integration of alternative methods for text recognition or information extraction.

Results and discussion. The results of the comparative evaluation are presented in Table 1, which summarizes the performance of three different pipelines combining text recognition and structured data extraction approaches.

Table 1 – The results of the comparative evaluation

Pipeline	Metrics					
	CER	WER	EM	Precision	Recall	F_1
TrOCR + Rules	~0.99	1.00	0	0.0	0.0	0.00
Tesseract + Rules	0.69	0.81	0	0.8	1.0	0.89
pdfplumber + Layout-aware	0.00	0.00	1	1.0	1.0	1.00

The obtained results demonstrate a clear difference in performance between the evaluated pipelines, particularly when comparing OCR-based approaches with layout-aware extraction. The transformer-based TrOCR model showed significantly lower performance, with high CER and WER values indicating substantial distortions in the recognized text. As a result, the extraction stage failed

completely, since rule-based methods rely on correctly recognized patterns.

The Tesseract-based pipeline achieved better text recognition quality, which enabled partial extraction of structured data. The results indicate that all relevant fields were detected, as reflected by high Recall, while lower Precision values reveal the presence of incorrectly extracted elements caused by OCR errors. This confirms that, although classical OCR methods provide more stable results, recognition errors still propagate to the extraction stage and reduce overall reliability.

In contrast, the layout-aware approach based on pdfplumber demonstrated the best performance across all evaluation metrics. By directly utilizing the textual layer of the PDF and preserving spatial relationships between document elements, this method eliminates recognition errors and ensures accurate extraction of structured data.

Overall, the results indicate that the effectiveness of medical document processing is determined primarily by the extraction stage and the ability to account for document structure, rather than by OCR accuracy alone.

Conclusion and future work. The conducted study addressed the problem of automated processing of medical laboratory reports with a focus on comparing different approaches to text recognition and structured data extraction. The experimental evaluation demonstrated that the overall effectiveness of document processing pipelines depends not only on OCR quality but, to a greater extent, on the methods used for extracting structured information.

The results of the comparative analysis showed that transformer-based OCR models, such as TrOCR, may produce unsatisfactory results without domain-specific adaptation, leading to a complete failure of the extraction stage. Classical OCR methods, represented by Tesseract, provide more stable recognition quality and enable partial extraction of relevant fields; however, recognition errors still negatively affect the final structured output. In contrast, the layout-aware approach based on pdfplumber achieved perfect performance across all evaluation metrics by leveraging the inherent structure of PDF documents and bypassing OCR altogether.

These findings confirm that the key challenge in processing medical documents lies in the correct interpretation of document structure and the reliable extraction of semantically meaningful data. The study highlights the importance of integrating layout-aware techniques into document processing pipelines and demonstrates that combining different approaches may be necessary to achieve robust performance across various document types.

Future work will focus on extending the experimental study to a larger and more diverse dataset of medical documents, including cases without an embedded text layer where OCR remains unavoidable. Additionally, it is planned to investigate advanced extraction methods, such as Named Entity Recognition (NER) models and layout-aware deep learning approaches (e.g., LayoutLM), which can better capture the relationship between textual content and document structure. Further research will also consider the development of hybrid pipelines that dynamically select the optimal processing strategy depending on document characteristics, as well as the integration of the proposed

system into real-world medical information systems for practical validation and decision support.

Declaration on the use of generative AI. During the preparation of this work, the authors used ChatGPT and Grammarly for grammar and spell checking, as well as for rephrasing and reformulating the text. After using these tools, the authors reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of this publication.

References

1. Patil S., Golbhavi S. *Advances and Applications of Natural Language Processing in Healthcare*. Available at: <https://www.ijraset.com/best-journal/advances-and-applications-of-natural-language-processing-in-healthcare> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.73380>.
2. Heilmeyer F., Böhringer D., Reinhard T., et al. *Viability of Open Large Language Models for Clinical Documentation in German Health Care: Real-World Model Evaluation Study*. Available at <https://medinform.jmir.org/2024/1/e59617/>: (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.2196/59617>.
3. Mazzucato E., Seinen M. *Advancements in Multilingual Biomedical Natural Language Processing: exploring Large Language Models for Named Entity Recognition and Linking*. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.64898/2026.01.22.26344605v1> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.64898/2026.01.22.26344605>.
4. Almeida S. S., Fontes R. S., Alves L. et al. *Artificial intelligence in healthcare text processing: a review applied to named entity recognition*. Available at: <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2025.1584203/full> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1584203>.
5. Loo-Torres R., Duran M., Toro-Tobon D., et al. *A systematic review of natural language processing methods and applications in thyrology*. Available at: [https://www.mcpcdigitalhealth.org/article/S2949-7612\(24\)00027-0/fulltext](https://www.mcpcdigitalhealth.org/article/S2949-7612(24)00027-0/fulltext) (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcpcdig.2024.03.007>.
6. Guo B., Liu H., Niu L. *Integration of natural and deep artificial cognitive models in medical images: BERT-based NER and relation extraction for electronic medical records*. Available at: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1266771/full> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1266771>.
7. Jothi G., Virgeniya S. C. *Medical data NER and classification using hybridized BERT model*. Available at: <https://wjaets.com/content/medical-data-ner-and-classification-using-hybridized-bert-model> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.13.1.0376>.
8. Ma M.-W., Gao X.-S., Zong H. et al. *Extracting laboratory test information from paper-based reports*. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1186/s12911-023-02346-6> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1186/s12911-023-02346-6>.
9. Abhijeet F. S. *Hybrid approaches for NER in noisy OCR medical records*. Available at: <https://ijsra.net/content/hybrid-approaches-ner-noisy-ocr-medical-records> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2025.16.3.2499>.
10. Zhang Q. *Improving classification accuracy for unstructured medical documents via multi-engine OCR and deep learning collaboration*. Available at: <https://scipublication.com/index.php/JACS/article/view/292> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.69987/jacs.2026.60201>.
11. Frei J., Kramer F. *GERNERMED – an open German medical NER model*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665963821000944> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2021.100212>.
12. Wei Q., Chen X., Cao C. *A technical framework for recognizing and interpreting complex medical records: based on multimodal large language model*. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/>

- 3702386.3702396 (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1145/3702386.3702396>.
13. Negm M., Mourad A., Fawzi S. et al. *Leveraging large language models for digitization and clinical interpretation of handwritten psoriasis reports*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11418814> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1109/MELECON64486.2026.11418814>.
14. Bai E., Luo X., Kutzin J. M. et al. *Assessment and integration of large language models for automated electronic health record documentation in emergency medical services*. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-025-02197-w> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10916-025-02197-w>.
15. Shrivastava D., Malathi H., Bansal S. et al. *Integrating natural language processing in medical information science for clinical text analysis*. Available at: <https://mw.ageditor.ar/index.php/mw/article/view/513> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.56294/mw2024513>.
16. Dhote M. G., Deore M. P., Jadhav T. et al. *Hybrid Vision-Language Models for Real-Time Surgical Report Generation and Documentation*. Available at: <https://jneonatalsurg.com/index.php/jns/article/view/2752> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.52783/jns.v14.2752>.
17. Tang Y. *Research on NLP-Based Automatic Summarization for Medical Records*. Available at: <https://www.clausiuspress.com/article/9613.html> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.23977/acs.2023.070903>.
18. Thorat Aditya S. *Automated Data Entry Through Image Processing for Medical Records*. Available at: <https://ijsrem.com/download/automated-data-entry-through-image-processing-for-advanced-medical-inventory/> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.55041/ijsrem50196>.
19. N. Bina. *The Role of Natural Language Processing in Medical Documentation*. Available at: <https://rojournals.org/wp-content/uploads/2025/02/ROJBAS-51-2025-P3.pdf> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.59298/rojbas%2F2025%2F511114>.
20. Raja M. S., Aarthi C. R., Gayathri P., Pavithra J. P. *Automated Prescription Analysis and Alternative Suggestion Using OCR and NLP*. Available at: <https://internationaljournalssrp.org/index.php/ijmst/article/view/92> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.64137/31079911%2Fijmst-v1i2p101>.
21. Paithankar S., Patil S., Shivgan A., Mahabudhe M., Dharmadhikari P. A. *Medical Prescription Generator using Natural Language Processing*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10969167> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1109/ISACC65211.2025.10969167>.
22. Gomathi S., Roopa Chandrika R. *Advancing Medical Image Processing with Deep Learning: Innovations and Impact*. Available at: <https://ictactjournals.in/ArticleDetails?id=bpkwui> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.21917/ijivp.2025.0494>.
23. Horlatch V., Pasichnyk V. *Automated Extraction of Key Parameters and Detection of Inconsistencies in Clinical Documentation Using Large Language Models*. Available at: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/337915> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337915>.
24. Stuhlmiller T. J., Rabe A. J., Rapp J. et al. *A Scalable Method for Validated Data Extraction from Electronic Health Records with Large Language Models*. Available at: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.02.25.25322898v1> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1101/2025.02.25.25322898>.
25. Senkadi Kh., Belmiloud M., Benslimane S. M., Dif N. *Multi-Label Classification of Digitized Clinical Records Using Transformer-Based Models*. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11298127> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1109/ICNAS68168.2025.11298127>.
26. Grinchenko M., Kutsenko D. *Models of medical center business processes to improve decision-making efficiency*. Available at: <https://journals.uran.ua/itssi/article/view/348508> (accessed: 28.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.005>.

Received 02.03.2026

Accepted 26.03.2026

Published 20.05.2026

УДК 004.89:61

М. А. ГРИНЧЕНКО, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, м. Харків, Україна, e-mail: marina.grinchenko@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8383-2675>

Д. О. КУЦЕНКО, здобувач освіти PhD, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри управління проектами в інформаційних технологіях, м. Харків, Україна, e-mail: Dmytro.O.Kutsenko@cs.khpri.edu.ua, ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-6359-3143>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСФОРМЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДОКУМЕНТІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЛУЧЕННЯ МЕДИЧНИХ ДАНИХ З PDF

У статті розглянуто задачу автоматизованої обробки медичних лабораторних звітів у форматі PDF з акцентом на розпізнавання тексту та вилучення структурованої інформації. Досліджено ефективність різних підходів до оптичного розпізнавання символів (OCR), зокрема класичних методів і трансформерних моделей, а також методів вилучення ключових медичних даних із неструктурованого та напівструктурованого тексту. Проведено порівняльний експериментальний аналіз із використанням медичних документів різного типу, зокрема таких, що мають табличну та текстову структуру. Оцінювання якості здійснювалося за допомогою набору кількісних метрик, серед яких Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), Exact Match (EM), Precision, Recall та F1-score. Отримані результати показали, що висока точність OCR не гарантує якісного вилучення структурованих даних, оскільки помилки розпізнавання суттєво впливають на подальші етапи обробки. Особливу увагу приділено підходам, що враховують структуру документа. Метод на основі прямого вилучення тексту з PDF із використанням `pdfplumber` продемонстрував найкращі результати завдяки збереженню просторових зв'язків між елементами документа та відсутності необхідності застосування OCR за наявності текстового шару. Результати дослідження підтверджують, що основна складність полягає у вилученні даних, а не лише у розпізнаванні тексту. Показано доцільність інтеграції структурно-орієнтованих та інтелектуальних методів для підвищення ефективності автоматизованих систем обробки медичних даних.

Ключові слова: оптичне розпізнавання символів, вилучення інформації, медичні документи, обробка медичних даних, методи з урахуванням структури документа, вилучення даних, аналіз документів, системи підтримки прийняття рішень, інструменти штучного інтелекту.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Гринченко Марина Анатоліївна / Grinchenko Marina Anatoliiovna

Автор 2 / Author 2: Куценко Дмитро Олександрович / Kutsenko Dmytro Oleksandrovich

О. Ю. МЕЛЬНИКОВ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; e mail: aymelnikov1973@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>

В. О. КАНИШЕВ, студент, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна, e mail: kanysevvlad@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8566-5034>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ФОНОВОГО ОФОРМЛЕННЯ САЙТІВ ДЛЯ КОРИСТУВАЧІВ ІЗ ПОРУШЕННЯМИ КОЛЬОРОСПРИЙНЯТТЯ

Метою роботи є дослідження методів оцінки якості фоновому оформлення сайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття. Наведено інформацію про види дальтонізму, проаналізовано наявні методи оцінювання якості кольорів для вебдизайну. Наведено приклади наявних сайтів, які мають функції для оцінки якості вебресурсів. Визначено наявні методи оцінки якості сайтів та проаналізовано наявні вебресурси. Представлено розроблену комплексну модель оцінки якості фоновому оформлення сайтів, що базуються на створенні алгоритмів для знаходження кольорів на зображеннях та сайтах, оцінці їх якості та побудови алгоритмів для симуляції видів дальтонізму. Описано приклади роботи реалізованої системи оцінки якості фоновому оформлення сайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття, її можливості та структуру. Об'єктом дослідження є процес визначення ефективності фоновому оформлення вебсайтів щодо сприйняття контенту користувачами з порушеннями кольоросприйняття. Предмет дослідження – методи оцінки якості фоновому оформлення вебсайтів, включаючи підбір кольорових схем, контрастність тексту та фону, а також адаптацію відображення інформації для користувачів із дальтонізмом. Новизною роботи є створення моделі, що поєднує в собі оцінку якості оформлення сайтів, визначення їх кольорів та надання рекомендацій для покращення кольорової схеми сайту. Практична цінність полягає в тому, що розроблено інформаційну систему – сайт, який надає рекомендації щодо оптимального підбору кольорових схем та оформлення вебсайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття, що дозволяє підвищити доступність та зручність сприйняття інформації.

Ключові слова: кольори, дальтонізм, види дальтонізму, дизайн, сайти, відображення бачення дальтонізму, javascript, інформаційна система, вебресурси, uml діаграми.

Вступ. У сучасному цифровому середовищі більшість інформації передається через вебресурси, що робить її доступність критично важливою для широкого кола користувачів. Забезпечення зручного сприйняття онлайн-контенту є невіддільною частиною сучасних інформаційних технологій і ключовим аспектом інклюзивного дизайну. Особливу увагу слід приділяти користувачам з порушеннями кольорового сприйняття, зокрема з дальтонізмом, оскільки неправильний вибір кольорів тексту, фону та графічних елементів може значно ускладнити сприйняття інформації або взагалі унеможливити його.

Проблема недостатньої адаптації вебсайтів до потреб таких користувачів залишається актуальною, оскільки більшість ресурсів створюється без урахування особливостей сприйняття кольорів і не проходить спеціалізовану перевірку доступності. Це призводить до того, що користувачі з вадами зору часто постають перед труднощами при навігації, читанні тексту та сприйнятті важливої графічної інформації. Тому дослідження методів оцінки якості фону вебсторінок є важливим кроком у створенні доступного вебконтенту, оскільки дозволяє визначити оптимальні підходи до вибору колірних схем, що забезпечують належний контраст, читабельність та загальну зручність користування вебсторінкою.

Окрім практичного значення, доступність вебресурсів для людей з порушеннями кольорового сприйняття має також соціально-етичний аспект. Вона сприяє рівному доступу до освітніх ресурсів, онлайн-послуг, державних і комерційних послуг, а також до важливої інформації, що поширюється в Інтернеті.

Недостатня увага до цього питання може призвести до обмеження прав користувачів і створити перешкоди в доступі до інформації, що негативно впливає на ефективність комунікації між джерелом і його аудиторією.

Було поставлено мету – дослідження методів оцінки якості фоновому оформлення сайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття. Для досягнення цієї мети створено спеціальний вебсайт, на якому застосовані методи відображення кольорів, адаптовані для користувачів із порушеннями кольорового сприйняття. Також використані методи оцінки поєднання тексту та фону для забезпечення оптимальної контрастності та зручності сприйняття інформації.

Огляд літератури. Дальтонізм – це порушення кольорового зору, яке виникає внаслідок несправності або відсутності певних колірних рецепторів (колбочок) у сітківці ока [1]. В результаті люди з дальтонізмом не можуть правильно сприймати деякі кольори або розрізняти їх між собою. Це захворювання є спадковим і найбільш поширене серед чоловіків, причому приблизно 8 % чоловіків і менше ніж 1 % жінок страждають від різних форм дальтонізму [2]. Цей розлад був досліджений Джоном Дальтоном, який проаналізував його на прикладі власного організму. Його роботи здобули визнання в міжнародній медичній спільноті, і стан названо на честь ученого [3].

Дальтонізм проявляється у різних формах, кожна з яких має свої специфічні ознаки [4]:

1. Монохромазія (ахроматопсія).
2. Дихромазія (часткова колірна сліпота).
3. Аномальна трихромазія (послаблене кольоросприйняття).

© Мельников О. Ю., Канишев В. О., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Монохроматія – це найрідкісніша та найважча форма колірної сліпоти, за якої людина бачить навколишній світ виключно в сірих тонах. Такий стан виникає через повну відсутність або нефункціональність усіх трьох типів колбочок (фоторецепторів) у сітківці ока.

Дихроматія характеризується відсутністю або порушенням роботи одного з трьох типів колірних рецепторів. Залежно від того, який саме рецептор уражений, розрізняють три види [5]:

- протанопія – ураження червоночутливих рецепторів, що ускладнює розпізнавання червоних тонів;
- дейтеранопія – дефект зеленочутливих рецепторів, коли зелений колір не сприймається належним чином;
- тританопія – вкрай рідкісне порушення синьочутливих рецепторів, що призводить до проблем з розрізненням синіх та жовтих кольорів.

При аномальній трихроматії всі три типи колбочок присутні, але один з них працює з пониженою ефективністю. Розрізняють три варіанти:

- протаномалія – ослаблене сприйняття червоного спектра; червоні відтінки виглядають менш інтенсивними та тьмянішими;
- дейтераномалія – найпоширеніша форма послабленого кольоросприйняття, за якої зелені тони сприймаються як знебарвлені та невиразні;
- тританомалія – рідкісний варіант з послабленим сприйняттям синього діапазону, коли сині та жовті кольори здаються ненасиченими.

Дальтонізм у людей може виникати внаслідок різноманітних причин, пов'язаних із порушенням функціонування світлочутливих клітин сітківки – колбочок. Основною та найпоширенішою причиною є генетичні фактори [6]. Окрім генетичних причин, дальтонізм може розвиватися внаслідок патологічних змін сітківки ока, таких як травми, запальні процеси чи дегенеративні захворювання [7].

Отримавши інформацію про дальтонізм, можемо зрозуміти, що кольори, які бачить людина, дуже сильно впливають на її розуміння світу, тому для вебдизайнерів потрібно чітко розуміти, які саме кольори використовувати на сайті та як їх поєднувати між собою. Для цього фахівці використовують правила UA/UX дизайну та кольорові сітки.

Дизайн користувальницького інтерфейсу (UI) відповідає за візуальне оформлення інтерфейсу, включаючи колірну палітру, кнопки, шрифт, іконки та контраст [8]. Для користувачів із колірною сліпотою неправильно підібрані кольори можуть значно ускладнити сприйняття інтерфейсу або практично зробити його нечитабельним. Наприклад, поєднання червоного та зеленого кольорів, яке часто використовується для позначення успіху або помилки, може виглядати майже однаково для людей з протанопією або дейтеранопією. Тому дизайнери повинні забезпечити достатній контраст, використовувати альтернативні способи позначення станів (наприклад, за допомогою форми, тексту або піктограм, а не тільки кольорів) і використовувати адаптивні колірні схеми.

UX (User Experience) дизайн фокусується на загальному досвіді користувача під час взаємодії з вебсайтом або додатком. Для людей з порушеннями сприйняття кольорів важливо, щоб усі функції залишалися інтуїтивно зрозумілими навіть без можливості розрізняти кольори [9]. Це означає, що ключові елементи повинні відрізнятися не тільки кольором, але й формою, структурою або контрастом. Крім того, дизайнери UX часто використовують тестування доступності (accessibility testing), щоб забезпечити зрозумілість та зручність інтерфейсу для всіх категорій користувачів.

Для того, щоб дизайн був одночасно естетично привабливим і зручним у використанні, застосовуються різні кольорові схеми. Кольорові схеми не є випадковим поєднанням кольорів, вони повинні взаємодіяти між собою, формуючи гармонійний і цілісний візуальний образ. У вебдизайні найчастіше використовуються такі типи кольорових комбінацій: монохромні схеми (використовують різні відтінки одного кольору, створюється гармонійна та спокійна атмосфера, але потребує уважного вибору відтінків для забезпечення достатнього контрасту); комплементарні (для поєднання кольорів, які знаходяться на протилежних сторонах кольорового кола – таких як червоний і зелений або синій і оранжевий, це створює яскравий, динамічний вигляд, але потрібно обережно використовувати контрастні кольори, щоб не перевантажити візуальне сприйняття); аналогічні (кольори, які знаходяться поряд на кольоровому колі – наприклад, жовтий, жовто-зелений і зелений, створюють гармонійний і спокійний вигляд, що добре підходить для сайтів, орієнтованих на натуральність і спокій); триадні (складаються з трьох кольорів, що рівно відстань між ними на кольоровому колі, це дозволяє створити баланс між кольорами, підвищуючи візуальну привабливість і динамізм дизайну) [10].

Постановка задачі. Оцінка читабельності тексту та доступності елементів інтерфейсу у вебдизайні базується на визначенні контрасту між кольором тексту та кольором фону. Найпоширенішим і стандартизованим методом є техніка, встановлена у Керівних принципах доступності вебконтенту (WCAG 2.1) [11]. Вона базується на обчисленні співвідношення відносної яскравості двох кольорів у просторі sRGB з урахуванням нелінійного сприйняття яскравості людським оком.

Метод WCAG дозволяє кількісно оцінити, наскільки текст або графічний елемент виділяється на тлі, забезпечуючи комфортне сприйняття інформації для широкого кола користувачів, включаючи людей з порушеннями зору.

В основі методики лежить обчислення відносної яскравості кольору L , яка характеризує сприйману яскравість з урахуванням характеристик людського зору. Розрахунок виконується у кілька етапів.

Колір у форматі RGB спочатку нормалізується до діапазону $[0,1]$, формула (1):

$$R_s = \frac{R}{255}, G_s = \frac{G}{255}, B_s = \frac{B}{255} \quad (1)$$

Оскільки око сприймає світність нелінійно, використовується корекція згідно зі стандартом IEC 61966-2-1 (sRGB), формула (2):

$$C = \begin{cases} \frac{C_s}{12.92}, C_s \leq 0.04045 \\ \left(\frac{C_s + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}, C_s > 0.04045 \end{cases}. \quad (2)$$

Після переходу в лінійний RGB відносна яскравість визначається за формулою (3) [12]:

$$L = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B. \quad (3)$$

Коефіцієнти відповідають спектральній чутливості людського ока: найбільше до зеленого, менше – до червоного і значно менше до синього.

WCAG визначає контраст як співвідношення більшої яскравості до меншої з додаванням постійної 0.05, яка компенсує вплив дуже темних значень, формула (4) [13]:

$$\text{ContrastRatio} = \frac{L1 + 0.05}{L2 + 0.05}, \quad (4)$$

де:

$L1$ — більша відносна яскравість,

$L2$ — менша відносна яскравість.

Значення контрастності знаходиться в діапазоні 1 : 1 (повна відсутність контрасту) до 21 : 1 (максимальний контраст — білий на чорному).

Для забезпечення доступності контенту WCAG встановлює мінімальні пороги контрастності:

Таблиця 1 – Пороги контрастності

Тип елемента	Мінімальний контраст
Звичайний текст (до 18 pt)	4.5 : 1
Великий текст (≥ 18 pt або ≥ 14 pt bold)	3 : 1
Іконки, контури, UI-елементи	3 : 1
Рівень AAA (підвищені вимоги)	7 : 1

Ці значення забезпечують комфортне сприйняття тексту користувачами з типовим зором, ослабленим сприйняттям контрасту та частковими порушеннями зору.

Порушення кольоросприйняття спричиняються дефектами або відсутністю одного з трьох типів колбочок сітківки: L , M або S , які відповідають за сприйняття довго-, середньо- і короткохвильової частини спектра (червоний, зелений, синій).

Симуляція дальтонізму у цифровому вигляді базується на моделюванні того, як змінюється спектральна чутливість колбочок, а також на лінійному перетворенні кольору за допомогою матриць, що відображають ці зміни.

Метою симуляції є перетворення кольорів зображення таким чином, щоб людина з нормальним

зором побачила приблизно те саме, що бачить людина з певним типом дальтонізму.

Для виконання симуляції відбувається перетворення кольорів в лінійний RGB. Для цього використовується формула (5) [14]:

$$RGB' = Matrix \cdot RGB. \quad (5)$$

Для моделювання порушень кольоросприйняття, а саме протанопії, застосовується матриця (6):

$$Matrix1 = \begin{bmatrix} 0.567 & 0.433 & 0.000 \\ 0.558 & 0.442 & 0.000 \\ 0.000 & 0.242 & 0.758 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для дейтеранопії застосовується матриця (7):

$$Matrix2 = \begin{bmatrix} 0.625 & 0.375 & 0.000 \\ 0.700 & 0.300 & 0.000 \\ 0.000 & 0.300 & 0.700 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для тританопії (8):

$$Matrix3 = \begin{bmatrix} 0.950 & 0.050 & 0.000 \\ 0.000 & 0.434 & 0.567 \\ 0.000 & 0.475 & 0.525 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Таким чином, знаючи початкові кольори, ми маємо можливість згенерувати симуляцію кольорів для будь-якого виду дальтонізму.

Під час аналізу наявних програмних рішень для порівняння кольорів, симуляції дальтонізму та оцінювання інклюзивності вебінтерфейсів було встановлено, що подібні системи практично відсутні. Серед знайдених інструментів можна виділити лише три проєкти, функціональність яких частково відповідає поставленим вимогам. Цими системами є:

- Colblindor [15];
- Aspos.app [16];
- ImageColorPicker.com [17].

Результати розрахунків. Система сайту матиме одну сторінку яка складатиметься з чотирьох вкладок [18-20]:

- аналіз сайту;
- аналіз скріншоту;
- калькулятор кольорів;
- звіт WCAG.

Структура проєктованої системи у вигляді UML діаграм, показана на рисунках нижче [21]: діаграма варіантів використання (рис. 1), діаграма класів (рис. 2), діаграма компонентів (рис. 3).

Для створення даної системи було використано наступні мови та доповнення до них:

- мова програмування JavaScript [24];
- кросплатформна платформа Node.js [25];
- мова гіпертекстової розмітки HTML [26];
- каскадні таблиці стилів CCS [27].

Структура сайту складається з трьох тек: CSS, JS, node_modules та зовнішніх файлів.

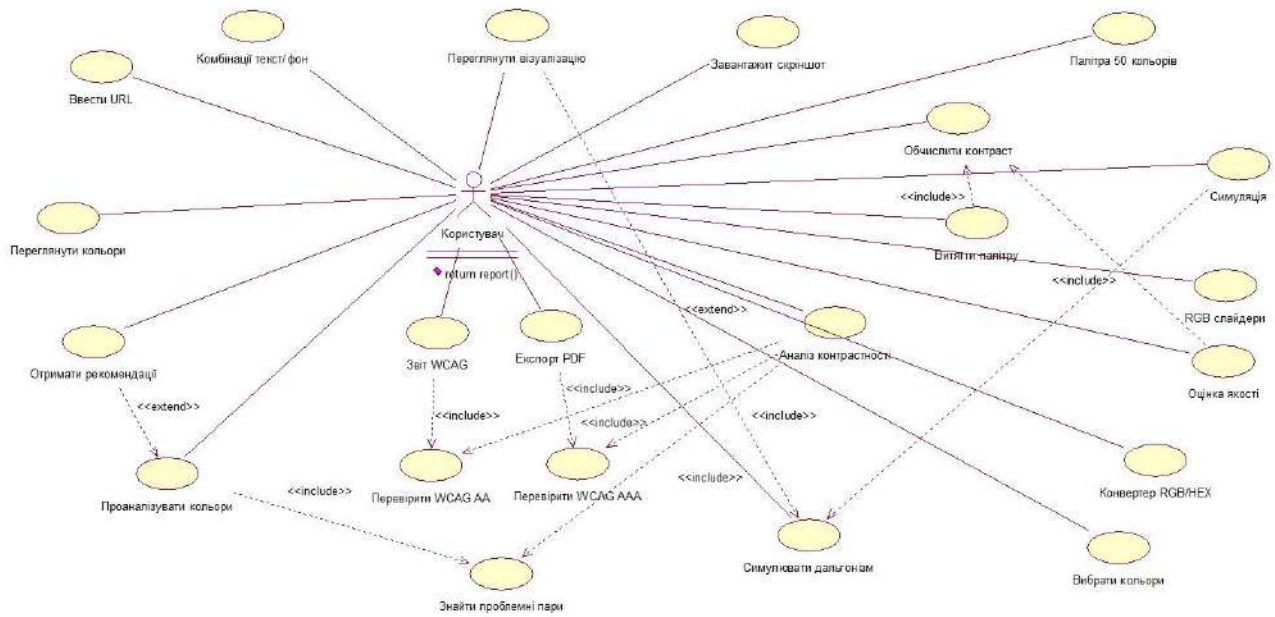


Рис. 1. Діаграма варіантів використання

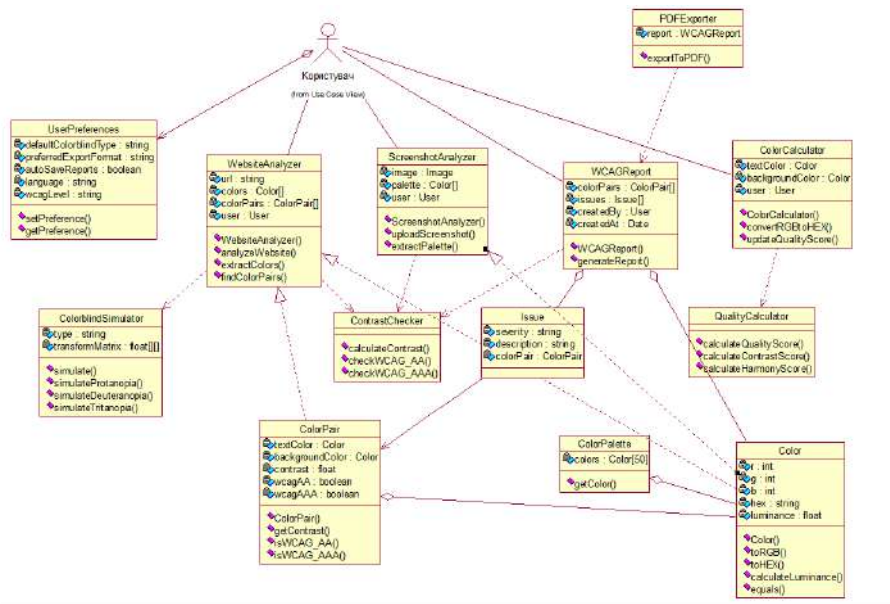


Рис. 2. Діаграма класів

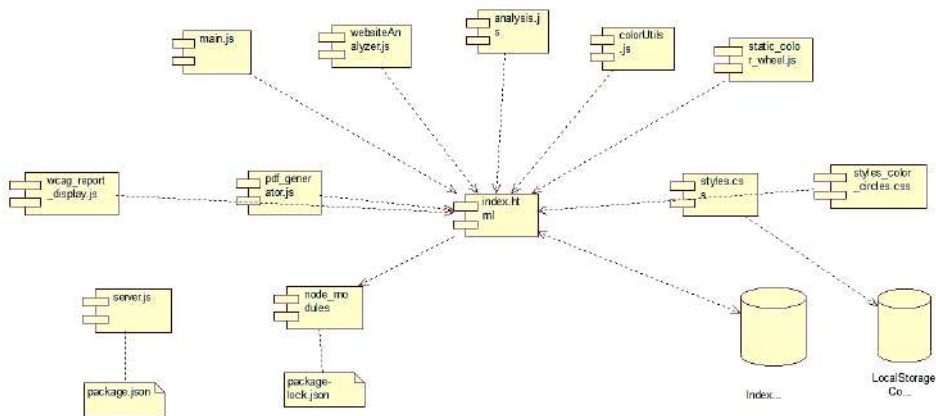


Рис. 3. Діаграма компонентів

Перша вкладка має назву «Аналіз сайту» та призначена для комплексного аналізу доступності вебсайтів за їх URL-адресою. Функціонал вкладки включає аналіз доступності для користувачів з порушеннями кольорового зору, автоматичне визначення найбільш живаних кольорів на вебсторінці та аналіз їх поєднань у контексті взаємодії тексту та фону.

Система здійснює симуляцію відображення кольірної гами сайту дня людей з різними типами дальтонізму, зокрема детеранопією, протанопією та тританопією, що дозволяє розробникам побачити, як їхній вебресурс сприймається користувачами з порушеннями кольорового зору. На основі проведеного аналізу вкладка надає детальні рекомендації щодо покращення доступності та приведення вебсайту у відповідність до міжнародних стандартів доступності WCAG. Результати аналізу включають інформацію про відповідність стандартам WCAGРІВНІВ AA та AAA, що дозволяє оцінити поточний стан доступності вебресурсу. Приклади роботи «Аналіз сайту» наведені на рис. 4 – рис. 9.

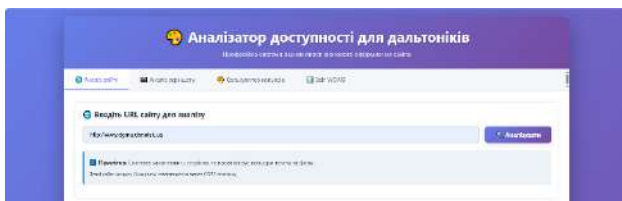


Рис. 4. Поле введення сайту

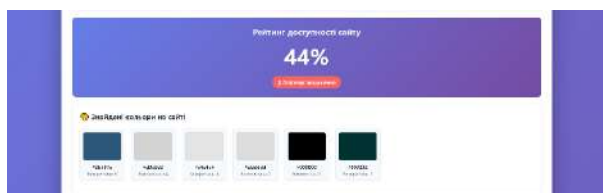


Рис. 5. Рейтинг доступності та знайдені кольори

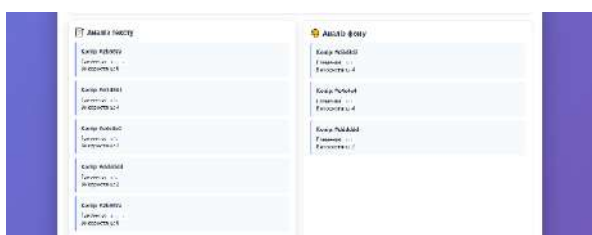


Рис. 6. Аналіз тексту та фону

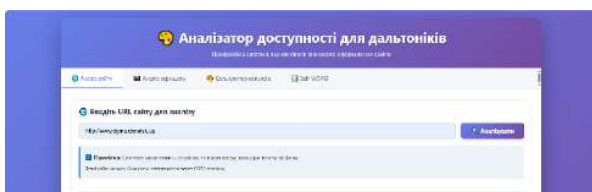


Рис. 7. Комбінації тексту та фону



Рис. 8. Симуляція дальтонізму

Друга вкладка «Аналіз скриншоту» призначена для комплексного аналізу доступності завантажених зображень вебсторінок. Функціонал вкладки включає можливість завантаження скриншотів у форматах PNG, JPG та WEBP з подальшим автоматичним визначенням кольорів палітри.

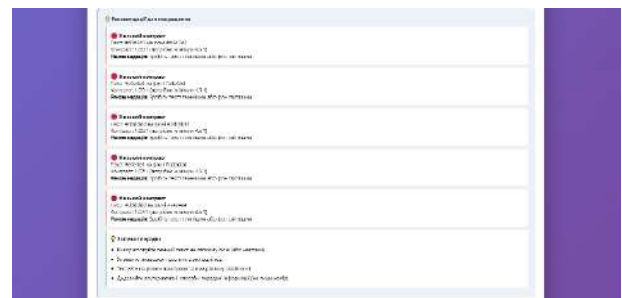


Рис. 9. Рекомендації та поради

На основі екстрагованих кольорів система здійснює аналіз їх поєднань, визначає пари текст-фон та виконує симуляцію відображення для користувачів з дейтеранопією, протанопією та тританопією. Вкладка автоматично розраховує коефіцієнт контрастності для виявлених кольірних пар, перевіряє їх відповідність стандартам WCAG рівнів AA та AAA, виявляє проблемні комбінації кольорів та надає рекомендації щодо покращення доступності. Результати аналізу представлені у вигляді детального звіту з візуалізацією виявленої палітри та симуляцією сприйняття кольорів людей з порушеннями кольорового зору.

Приклади роботи «Аналіз скриншоту» наведені на рис. 10 – рис. 12.

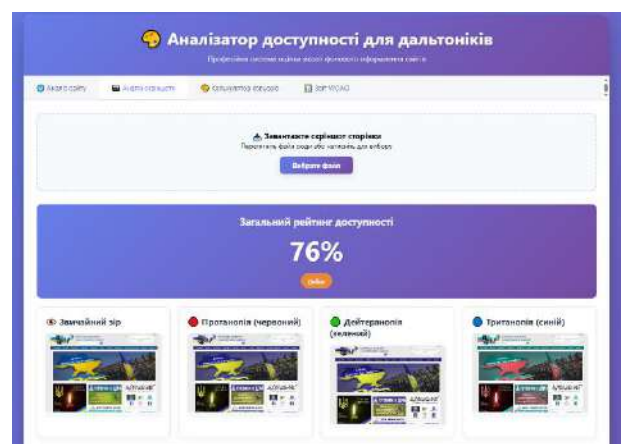


Рис. 10. Аналіз сайту через скриншот та симуляція видів дальтонізму

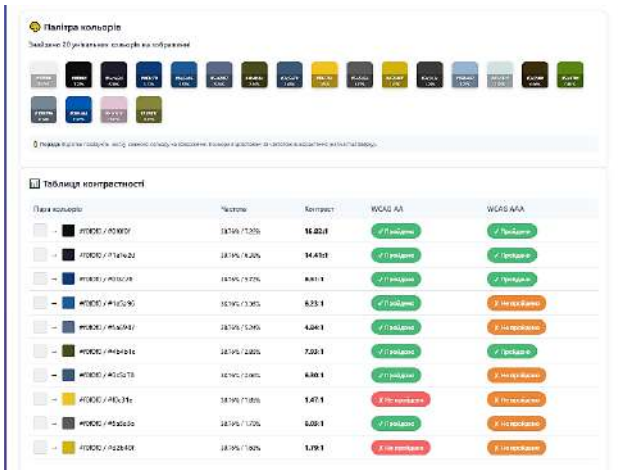


Рис. 11. Таблиця порівняння пар кольорів

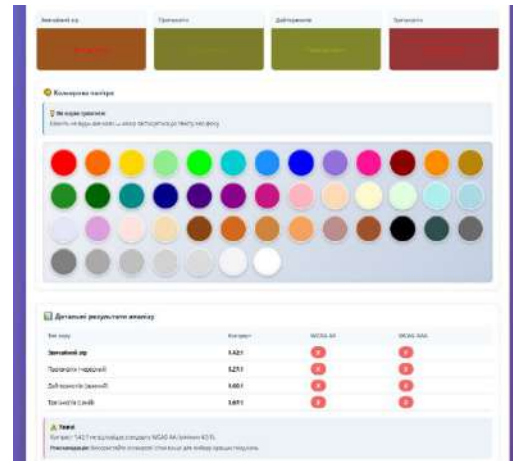


Рис. 15. Палітра кольорів та деталі аналізу

Остання вкладка має назву «Звіт WCAG», вона показує коротку інформацію з вкладок «Аналіз сайту» та «Аналіз скріншоту» і дає можливість завантажити отримані результати в форматі ПДФ (рис. 16).

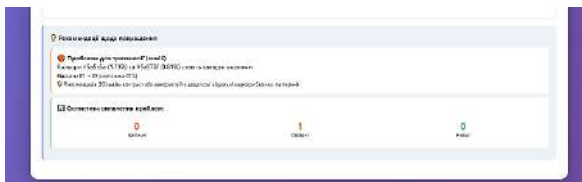


Рис. 12. Рекомендації

Третьою вкладкою є «Калькулятор кольорів». За допомогою неї можна обирати кольори тексту та фону і порівнювати їх між собою. А саме як вони будуть виглядати при симуляції. Окрім цього можна робити конвертацію формату RGB в HEX та навпаки. Обирати кольори можна вводючи коди вручну. Обираючи з палітри, перетягуючи повзунки RGB, або вибравши з палітри найпоширеніших кольорів. Після вибору потрібних кольорів система покаже рейтинг доступності та рекомендації.

Приклади роботи наведені на рис. 13 – рис. 15.

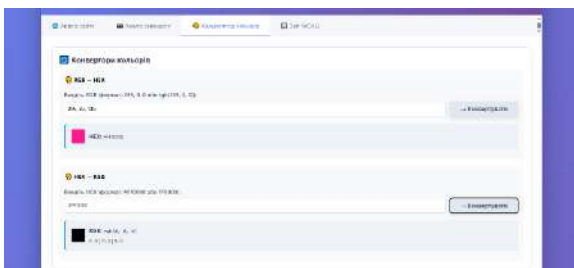


Рис. 13. Конвертори кольорів

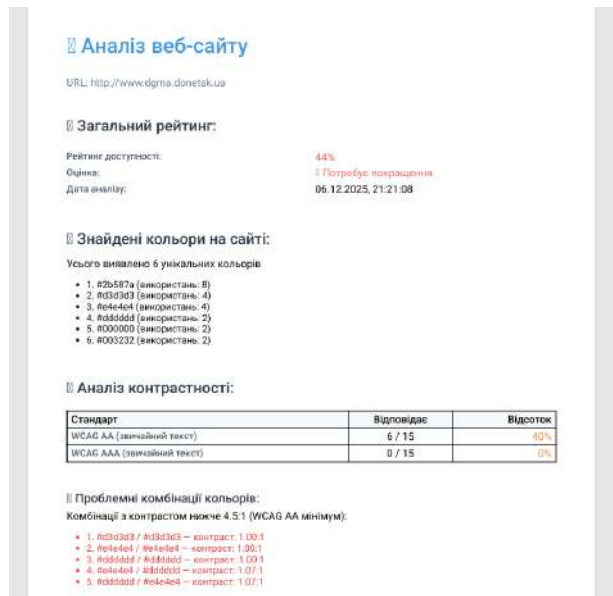


Рис. 16. Готовий звіт в форматі ПДФ

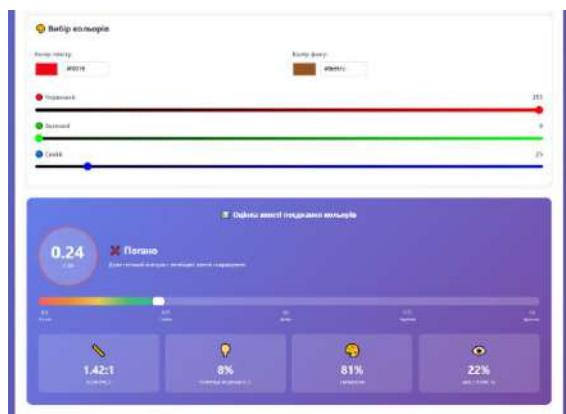


Рис. 14. Вибір кольорів та отримання результатів

Висновки. Створена модель поєднує в собі оцінку якості оформлення сайтів, визначання їх кольорів та надання рекомендацій для покращення кольорової схеми сайту. Розроблено інформаційну систему – сайт, який надає рекомендації щодо оптимального підбору кольорових схем та оформлення вебсайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття, що дозволяє підвищити доступність та зручність сприйняття інформації.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори використовували ChatGPT для пошуку літературних джерел, перевірки граматики та орфографії, DeepL для перекладу. Після використання цих інструментів/сервісів автори перевірили та відредагували вміст за необхідності та несуть повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел інформації

1. *Дальтонізм: що це таке, причини кольорової сліпоту ока*. Visiobud. 2025. URL: <https://www.visiobud.com/uk/2021/12/10/daltonizm-shho-tse-prichini-kolorovoyi-slipoti-ok/> (дата звернення: 23.02.2026).
2. *Чому виникає дальтонізм*. URL: <http://astravisus.rv.ua/article/chomu-vynikaie-daltonizm-647.html> (дата звернення: 23.02.2026).
3. Constable E. C. John Dalton – the man and the myth. *Dalton Transactions*. 2022. Vol. 51. P. 768–776. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1DT04135E>.
4. *Види дальтонізму*. URL: <https://doc.ua/ua/news/articles/daltonizm-voprosy-i-otvety> (дата звернення 23.02.2026).
5. *Опис видів дальтонізму*. URL: <https://suspilne.media/chnihiv/305370-daltonizm-comu-vynikaie-tahto-mae-shilnist-roasnue-likar> (дата звернення: 23.02.2026).
6. Mustafi D., Engel A. H., Palczewski K. Structure of Cone Photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research*. 2009. Vol. 28, issue 4. P. 289–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2009.05.003>.
7. *Причини захворювання*. URL: <https://apteka.net.ua/articles/daltonizm-chomu-vynykaye-kolirna-slipota-vydy-ta-profilaktyka> (дата звернення: 23.02.2026).
8. *Що таке UI дизайн*. URL: <https://te.itstep.org/blog/ui-and-ux-design> (дата звернення: 23.02.2026).
9. *What is User Experience (UX) Design? Interaction Design Foundation*. URL: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design> (дата звернення: 23.02.2026).
10. *Кольорові схеми*. URL: https://w3schoolsua.github.io/colors/colors_schemes.html (дата звернення: 23.02.2026).
11. *Інформація про WCAG*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/mintsyfy-ukrainski-rozrobnyky-zmozhut-stvoriuvaty-bilshe-onlain-resursiv-dostupnykh-dlia-liudei-z-porushenniam-zoru-chy-slukhu> (дата звернення: 23.02.2026).
12. *Designing for color blindness*. URL: <https://mk.bcgsc.ca/colorblind/math.mhtml> (дата звернення: 23.02.2026).
13. *Building your own color contrast checker*. URL: <https://dev.to/alvaromontoro/building-your-own-color-contrast-checker-4j7o> (дата звернення: 23.02.2026).
14. *Color Theory: Playing with Colors Programmatically*. URL: <https://dev.to/ayybbbt/color-theory-playing-with-colors-programmatically-h96> (дата звернення: 23.02.2026).
15. *Color Blindness Simulator*. URL: https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/#google_vignette (дата звернення: 23.02.2026).
16. *Сайт ASPOSE*. URL: <https://products.aspose.app/html/uk/web-accessibility-checker> (дата звернення: 23.02.2026).
17. *ImageColorPicker.com*. URL: <https://imagecolorpicker.com/uk> (дата звернення: 23.02.2026).
18. Канішев В. О., Мельников О. Ю. Постановка задачі створення застосунку для аналізу рівня задоволення сайтами людей із порушенням кольоросприйняття. *Сучасні інформаційні системи та технології: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. за тематикою «Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні» (29 листопада 2024 р., м. Херсон, м. Хмельницький) / за ред. А. А. Григорової*. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. С. 180–181.
19. Канішев В. О., Мельников О. Ю. Вебзастосунок для розрахунку ступеня бачення дизайну сайтів для людей з порушенням кольоросприйняття. *Розвиток науки – простір для відновлення регіону: збірник тез наукової конференції молодих вчених 19 грудня 2024 р.* Краматорськ: Донецька обласна державна адміністрація, Рада молодих вчених при Донецькій облдержадміністрації, 2024. С. 76–79.
20. Мельников О. Ю., Канішев В. О. Система підтримки прийняття рішень для виявлення аномалій визначення кольорів. *Automation of Technological and Business Processes*. Одеса: ОНТУ, 2024. № 16 (3). С. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2921>.
21. Мельников О. Ю. *Об'єктно-орієнтований аналіз і проектування інформаційних систем: посібник для студентів спеціальностей «Системний аналіз» та «Інформаційні системи та технології»*. Вид. 3-є, перероб. та доп. Краматорськ: ДДМА, 2020. 208 с.
22. Andrew Stockman, Lindsay T. Sharpe. Human cone spectral sensitivities: a progress report. *Vision Research*. 1998. Vol. 38, issue 21. P. 3193–3206. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00660-1](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00660-1).
23. Ruderman D. L., Cronin T. W., Chiao C. C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding. *Journal of the Optical Society of America A*. 1998. №15. P. 2036–2045.
24. Flanagan D. *JavaScript: The Definitive Guide*. Sebastopol: O'Reilly Media. 2020. 1096 p.
25. Tilkov S., Vinoski S. Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs. *IEEE Internet Computing*. 2010, Vol. 14, issue 6. P. 80–83.
26. Berners-Lee T., Connolly D. *Hypertext Markup Language (HTML)*. *Internet Engineering Task Force (IETF)*. 1995. RFC 1866. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC1866>.
27. Lie H. W., Bos B. *Cascading Style Sheets, level 1*. *World Wide Web Consortium (W3C)*. *W3C Recommendation 17 Dec1996*. URL: <https://www.w3.org/TR/CSS1/> (дата звернення: 23.02.2026).

References (transliterated)

1. *Color Blindness: What It Is and the Causes of Color Vision Deficiency*. Visiobud. 2025. Available at: <https://www.visiobud.com/uk/2021/12/10/daltonizm-shho-tse-prichini-kolorovoyi-slipoti-ok/> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
2. *Why does color blindness occur?* [Chomu vynykaiie daltonizm]. Available at: <http://astravisus.rv.ua/article/chomu-vynikaie-daltonizm-647.html> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
3. Constable E. C. John Dalton – the man and the myth. *Dalton Transactions*. 2022, vol. 51, pp. 768–776. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1DT04135E>.
4. *Types of color blindness* [Vydy daltonizmu]. Available at: <https://doc.ua/ua/news/articles/daltonizm-voprosy-i-otvety> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
5. *Description of types of color blindness* [Opys vydiv daltonizmu]. Available at: <https://suspilne.media/chnihiv/305370-daltonizm-comu-vynikaie-tahto-mae-shilnist-roasnue-likar> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
6. Mustafi D., Engel A. H., Palczewski K. Structure of Cone Photoreceptors. *Progress in Retinal and Eye Research*. 2009, vol. 28, issue 4, pp. 289–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2009.05.003>.
7. *Causes of the disease* [Prychyny zakhvoriuvannia]. Available at: <https://apteka.net.ua/articles/daltonizm-chomu-vynykaye-kolirna-slipota-vydy-ta-profilaktyka> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
8. *What is UI design?* [Shcho take UI dizain]. Available at: <https://te.itstep.org/blog/ui-and-ux-design> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
9. *What is User Experience (UX) Design? Interaction Design Foundation*. URL: <https://www.interaction-design.org/literature/topics/ux-design> (accessed: 23.02.2026).
10. *Color schemes* [Kolorovi skhemy]. Available at: https://w3schoolsua.github.io/colors/colors_schemes.html (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
11. *Information about WCAG* [Informatsiia pro WCAG]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/mintsyfy-ukrainski-rozrobnyky-zmozhut-stvoriuvaty-bilshe-onlain-resursiv-dostupnykh-dlia-liudei-z-porushenniam-zoru-chy-slukhu> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
12. *Designing for color blindness*. Available at: <https://mk.bcgsc.ca/colorblind/math.mhtml> (accessed: 23.02.2026).
13. *Building your own color contrast checker*. Available at: <https://dev.to/alvaromontoro/building-your-own-color-contrast-checker-4j7o> (accessed: 23.02.2026).
14. *Color Theory: Playing with Colors Programmatically*. Available at: <https://dev.to/ayybbbt/color-theory-playing-with-colors-programmatically-h96> (accessed: 23.02.2026).
15. *Color Blindness Simulator*. Available at: https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/#google_vignette (accessed: 23.02.2026).
16. *ASPOSE website* [Sait ASPOSE]. Available at: <https://products.aspose.app/html/uk/web-accessibility-checker> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
17. *ImageColorPicker.com*. Available at: <https://imagecolorpicker.com/uk> (accessed: 23.02.2026). (In Ukr.).
18. Kanishev V. O., Melnykov O. Yu. Setting the task of creating an application to analyze the level of satisfaction with websites of people

- with color vision impairment [Postanovka zadachi stvorennia zastosunku dlia analizu rivnia zadovolennia saitamy liudei iz porushenniam kolorospryiniattia]. *Modern information systems and technologies: materials of the VII All-Ukrainian scientific and practical Internet conference on the topic "Modern computer systems and networks in management"* (November 29, 2024, Kherson, Khmelnytskyi) / edited by A. A. Grigorova [Suchasni informatsiini systemy ta tekhnolohii: materialy VII Vseukr. nauk.-prakt. internet-konf. za tematykoiu «Suchasni kompiuterni systemy ta merezhi v upravlinni» (29 lystopada 2024 r., m. Kherson, m. Khmelnytskyi). Kherson, Book Publishing House of Vyshemirskiy V. S. Publ., 2024, pp. 180–181. (In Ukr.).
19. Kanishev V. O., Melnykov O. Yu. Web application for calculating the degree of vision of website design for people with color vision impairment [Vebzastosunok dlia rozrakhunku stupenia bachennia dyzainu saitiv dlia liudei z porushenniam kolorospryiniattia]. *The development of science is a space for the restoration of the region: collection of abstracts of the scientific conference of young scientists on December 19, 2024*. [Rozvytok nauky – prostir dlia vidnovlennia rehionu: zbirnyk tez naukovoï konferentsii molodykh vchenykh 19 hrudnia 2024 r.]. Kramatorsk, Donetsk Regional State Administration, Council of Young Scientists under the Donetsk Regional State Administration Publ., 2024, pp. 76–79. (In Ukr.).
20. Melnykov O. Yu., Kanishev V. O. Decision support system for detecting color recognition anomalies [Systema pidtrymky pryiniattia rishen dlia vyvavlennia anomalii vyznachennia koloriv]. *Automation of Technological and Business Processes* [Avtomatyzaciya tekhnologichnyx i biznes-procesiv]. Odesa, ONTU Publ., 2024, vol. 16 (3), pp. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2921> (In Ukr.).
21. Melnykov O. Yu. *Object-oriented analysis and design of information systems: a manual for students of the specialties "Systems Analysis" and "Information Systems and Technologies"*. 3rd ed., revised and supplemented [Obiektno-orientovanyi analiz i proiektuvannia informatsiinykh system: posibnyk dlia studentiv spetsialnosti «Systemnyi analiz» ta «Informatsiini systemy ta tekhnolohii». Vyd. 3-ye, pererob. ta dop]. Kramatorsk, DSEA Publ., 2020. 208 p. (In Ukr.).
22. Andrew Stockman, Lindsay T. Sharpe. Human cone spectral sensitivities: a progress report. *Vision Research*. 1998, vol. 38, issue 21, pp. 3193–3206. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(98\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00060-1).
23. Ruderman D. L., Cronin T. W., Chiao C. C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding. *Journal of the Optical Society of America A*. 1998, no. 15, pp. 2036–2045.
24. Flanagan D. *JavaScript: The Definitive Guide*. Sebastopol. O'Reilly Media. 2020. 1096 p.
25. Tilkov S., Vinoski S. Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs. *IEEE Internet Computing*. 2010, volume 14, issue 6, pp. 80–83.
26. Berners-Lee T., Connolly D. *Hypertext Markup Language (HTML). Internet Engineering Task Force (IETF)*. 1995, RFC 1866. DOI: <https://doi.org/10.17487/RFC1866>
27. Lie H. W., Bos B. *Cascading Style Sheets, level 1*. World Wide Web Consortium (W3C). *W3C Recommendation 17 Dec1996*. Available at: <https://www.w3.org/TR/CSS1/> (accessed: 23.02.2026).

Надійшла (received) 06.03.2026

Прийнята (accepted) 30.03.2026

Оприлюднена (published) 20.05.2026

UDC 004.4:612.845

O. Yu. MELNYKOV, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor at the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; e-mail: aymelnikov1973@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>

V. O. KANISHEV, Donbas State Engineering Academy, Student, Kramatorsk, Ukraine, e mail: kanysevvlad@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8566-5034>

RESEARCH ON METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF WEBSITE BACKGROUND DESIGN FOR USERS WITH COLOR VISION IMPAIRMENTS

The purpose of the work is to study methods for assessing the quality of background design of websites for users with color blindness. Information about types of color blindness is provided, existing methods for assessing the quality of colors for web design are analyzed. Examples of existing sites that have functions for assessing the quality of web resources are provided. Existing methods for assessing the quality of sites are identified and existing web resources are analyzed. A developed comprehensive model for assessing the quality of background design of websites is presented, based on the creation of algorithms for finding colors on images and sites, assessing their quality, and building algorithms for simulating types of color blindness. Examples of the work of the implemented system for assessing the quality of background design of websites for users with color blindness, its capabilities, and structure are described. The object of the study is the process of determining the effectiveness of background design of websites in terms of the perception of content by users with color blindness. The subject of the study is methods for assessing the quality of website background design, including the selection of color schemes, contrast of text and background, and adaptation of information display for users with color blindness. The novelty of the work is the creation of a model that combines the assessment of the quality of website design, determining their colors and providing recommendations for improving the color scheme of the site. The practical value lies in the fact that an information system has been developed - a site that provides recommendations for the optimal selection of color schemes and website design for users with color vision impairments, which allows to increase the accessibility and convenience of information perception.

Keywords: colors, color blindness, types of color blindness, design, websites, display of color blindness vision, javascript, information system, web resources, uml diagrams.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Мельников Олександр Юрійович, Melnykov Oleksandr Yuriyovych

Автор 2 / Author 2: Канішев Владислав Олександрович, Kanishev Vladyslav Oleksandrovych

Т. В. ПЕТРИШАК, аспірант кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: taras.v.petryshak@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6296-3867>

В. А. ВИСОЦЬКА, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; e-mail: Victoria.A.Vysotska@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-3689>

ОЦІНЮВАННЯ ЗДАТНОСТІ МОДЕЛЕЙ ВИЯВЛЕННЯ AI-ЗГЕНЕРОВАНИХ ТЕКСТІВ ДО УЗАГАЛЬНЕННЯ В УМОВАХ НЕВІДОМОГО ГЕНЕРАТОРА

Багато детекторів AI-згенерованих текстів демонструють високі показники якості на вибірках, сформованих у межах типових протоколів оцінювання. Зокрема, класичні моделі, що використовують стилеметричні ознаки, такі як довжина тексту, пунктуаційні патерни та узагальнені показники формальності, здатні ефективно виявляти статистичні закономірності генерації. Проте їхня ефективність суттєво знижується у випадках, коли з'являються тексти, створені невідомими генераторами. У таких умовах розподіл ознак змінюється, що призводить до погіршення якості класифікації, насамперед через зростання кількості хибно негативних помилок. У роботі досліджено здатність моделей до узагальнення в умовах появи невідомого генератора. Порівняння проводиться між класичними стилеметричними моделями та трансформерними підходами з використанням експериментального протоколу LOGO (Leave-One-Generator-Out). Розглядається задача бінарної класифікації текстів у двох доменах (Reddit, Wikipedia) із використанням трьох генераторів: ChatGPT, Davinci та Dolly. До класичних моделей віднесено Random Forest і Gradient Boosting, тоді як трансформерні підходи представлені моделями DistilBERT і RoBERTa. Якість моделей оцінювалася за метриками Accuracy, Precision, Recall, F1 та Macro-F1 з подальшим усередненням результатів за кількома ініціалізаціями. Отримані результати свідчать, що трансформерні моделі демонструють вищу здатність до узагальнення на даних, згенерованих невідомими моделями. Водночас стилеметричні підходи демонструють істотне погіршення якості, зокрема залежно від домену та довжини тексту. Аналіз помилок показує, що ключовим фактором зниження ефективності є зростання кількості хибно негативних класифікацій. Додатковий аналіз важливості ознак підтверджує, що класичні моделі значною мірою залежать від поверхневих характеристик тексту, які не забезпечують стабільної узагальнювальної здатності. Отже, результати дослідження підкреслюють необхідність оцінювання детекторів у межах протоколу LOGO для досягнення надійної стійкості до появи нових генераторів.

Ключові слова: виявлення згенерованих текстів, здатність до узагальнення, невідомий генератор, стилеметричні ознаки, трансформерні моделі, класифікація текстів.

Вступ. Більшість сучасних детекторів AI-згенерованих текстів демонструють високі показники точності під час оцінювання на бенчмарках [1]. Класичні моделі машинного навчання, що базуються на стилеметричних ознаках, зокрема довжині речень, частотності n-грам, пунктуаційних патернах та узагальнених показниках формальності, здатні ефективно виявляти статистичні закономірності машинної генерації за умови роботи в межах відомого розподілу даних [2]. Це пояснюється тим, що великі мовні моделі під час генерації формують відносно стабільні структурні патерни.

Водночас на практиці ефективність таких підходів суттєво знижується у разі появи нового, невідомого алгоритму генерації. У таких умовах поверхневі сигнали, на які спираються стилеметричні методи, змінюються, оскільки різні моделі формують тексти з відмінними характеристиками довжини, пунктуації та словникового складу. Це призводить до погіршення якості детекції, зокрема через зростання кількості хибно негативних помилок, коли згенерований текст класифікується як людський. Зазначена проблема пов'язана з явищем генераторного зсуву, яке у ширшому контексті відповідає задачі узагальнення моделей за межами навчального розподілу даних. Для її коректного дослідження необхідні підходи, що забезпечують ізоляцію джерела генерації під час оцінювання.

У цій роботі розглядається задача оцінювання здатності моделей до узагальнення в умовах появи невідомого генератора з використанням протоколу LOGO (Leave-One-Generator-Out) [3].

Методи дослідження. Методологія дослідження базується на формуванні контрольованих умов тестування, за яких генератор тексту, що використовується на етапі оцінювання, повністю відсутній у навчальній вибірці та є невідомим для моделі детектора. Такий підхід дає змогу коректно оцінити здатність моделей до узагальнення в умовах зміни джерела генерації. У межах дослідження розв'язується задача бінарної класифікації текстів, у якій тексти людського авторства позначаються міткою Human (0), а тексти, згенеровані мовними моделями, міткою Machine (1).

Експеримент виконано на підмножині розмічених даних мультидоменного бенчмарку M4 [1]. Для аналізу обрано два домени, що суттєво відрізняються за стилем: Reddit (неформальні дискусії) та Wikipedia (формальний, структурований текст). Кількісні характеристики тестових наборів даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Кількісні характеристики тестових вибірок

Сценарій	Обсяг	Reddit	Wiki	Людські	Машинні
logo_chatgpt	3600	1842	1758	1800	1800
logo_davinci	3600	1842	1758	1800	1800
logo_dolly	3514	1842	1672	1800	1714

Як видно з табл. 1, обсяг тестової вибірки для кожного зі сценаріїв оцінювання складав близько 3500–3600 унікальних текстів. Розподіл даних за доменами був відносно рівномірним, із незначною перевагою текстів із платформи Reddit. Для забезпе-

© Петришак Т. В., Висоцька В. А., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



чення чистоти експерименту кількість текстів негативного класу (Human) була суворо зафіксована на рівні 1800 екземплярів для кожного сценарію тестування, а відхилення в обсязі класу Machine для моделі Dolly відображає природний розподіл даних після етапу очищення.

Загальна архітектура експерименту та основні етапи дослідження представлені на рис. 1. Процес реалізації включає чотири взаємопов'язані логічні блоки, а саме підготовку вхідних даних, формування та

Для класифікації було порівняно дві групи алгоритмів. Перша група охоплює трансформерні моделі DistilBERT і RoBERTa [7, 8], що використовують контекстне донавчання з обмеженням довжини вхідної послідовності до 512 токенів. До другої групи віднесено класичні стиліметричні ансамблі Random Forest (RF) та Gradient Boosting (GB) [9, 10]. На відміну від трансформерних моделей, класичні підходи навчалися на спеціально сформованому векторі ознак, отриманому на етапі конструювання ознак (feature

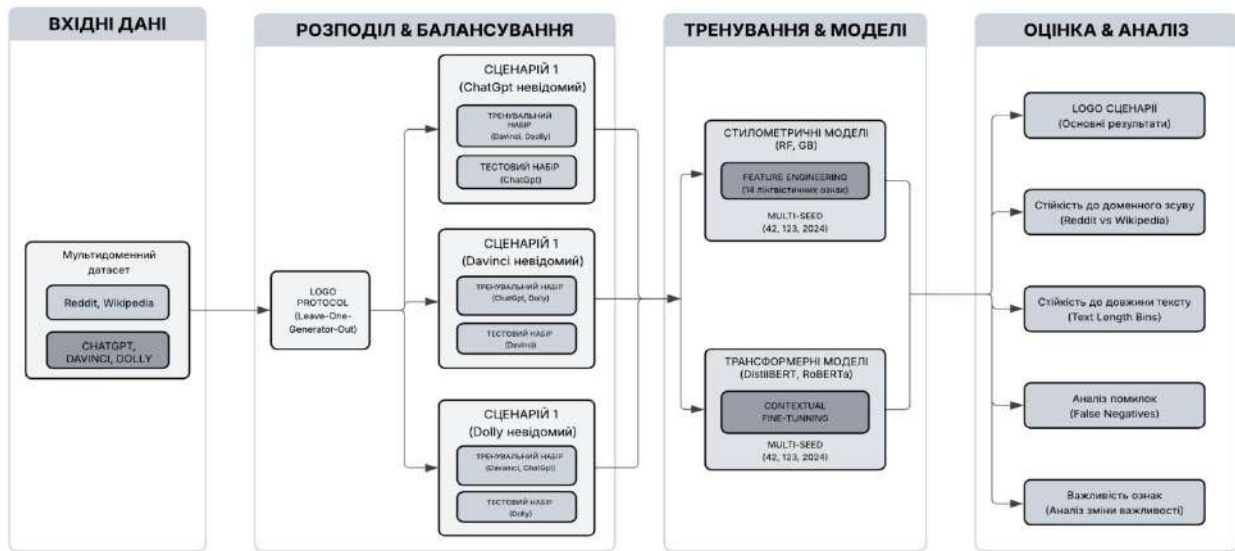


Рис. 1. Архітектура експерименту та етапи дослідження

балансування вибірок, навчання моделей, а також комплексне оцінювання їхньої стійкості та узагальнювальної здатності.

У дослідженні використано тексти, згенеровані трьома мовними моделями з відмінними архітектурними характеристиками: ChatGPT, Davinci та Dolly [4]. Для усунення дублювань застосовувалося хешування, а для запобігання витоків даних розподіл вибірок виконувався методом GroupShuffleSplit із групуванням за ідентифікатором group_id, що поєднує домен і джерело [5].

Ключовим елементом оцінювання є протокол LOGO. У межах експерименту реалізовано три незалежні сценарії (logo_dolly, logo_chatgpt, logo_davinci), у кожному з яких один генератор повністю виключається з навчальної та валідаційної вибірок і з'являється лише на етапі тестування. Для забезпечення коректності навчання тренувальні вибірки (train) були збалансовані за класами за допомогою методів undersampling [6], тоді як тестові вибірки (test) зберігали природний розподіл. Щоб гарантувати стабільність результатів і відокремити вплив випадкового розбиття від впливу ініціалізації моделі, розподіл даних (split) фіксувався єдиним параметром split_seed (42), а навчання моделей проводилося багаторазово з різними параметрами ініціалізації train_seed (42, 123, 2024). Усі кінцеві метрики агрегувалися у форматі середнього значення та стандартного відхилення.

engineering), який містить 14 стиліметричних характеристик [11]. Ці ознаки описують базові поверхневі лінгвістичні властивості текстів і наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Стилiметричні ознаки

Назва ознаки	Коротке пояснення
simpsons_d	Лексичне різноманіття (індекс Сімпсона)
yules_k	Лексичне багатство (індекс Юла)
type_token_ratio	Відношення типів до токенів
word_count	Загальна кількість слів у тексті
sentence_count	Загальна кількість речень у тексті
avg_word_length	Середня довжина слова у символах
avg_sentence_length	Середня кількість слів у реченні
punctuation_ratio	Частка пунктуації
function_word_ratio	Частка службових слів
noun_ratio	Відносна частка іменників у тексті
verb_ratio	Відносна частка дієслів у тексті
pronoun_ratio	Відносна частка займенників у тексті
flesch_reading_ease	Індекс читабельності Флеша
gunning_fog_index	Індекс складності (Gunning Fog)

Результати дослідження. Отримані результати показують, що трансформерні моделі демонструють вищу здатність до узагальнення в умовах невідомого генератора порівняно зі стиліметричними ансамблями.

На рис. 2 представлено агреговані показники метрики Macro-F1 для всіх моделей у кожному зі сценаріїв LOGO.

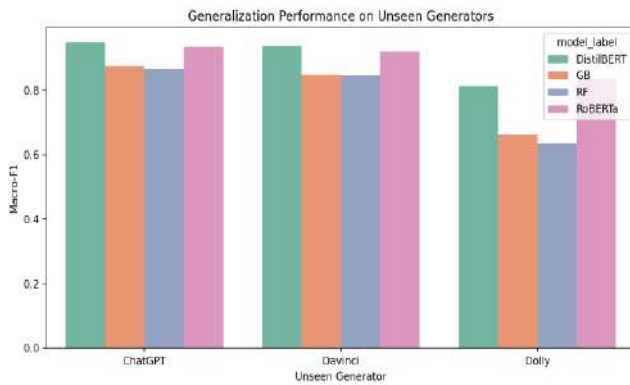


Рис. 2. Загальна здатність моделей до узагальнення у трьох сценаріях

У сценаріях, де тестовими генераторами виступали моделі від OpenAI (ChatGPT та Davinci), DistilBERT та RoBERTa впевнено долають поріг метрики Macro-F1 у 0.85–0.95. Водночас класичні моделі демонструють відчутну деградацію. Найбільший розрив спостерігається у сценарії logo_dolly, де тестовою моделлю виступає відкрита архітектура. Зіткнувшись із принципово новим патерном генерації, стилеметричні моделі втрачають здатність до ефективного розрізнення класів: Macro-F1 для Random Forest падає до значень близько 0.65, що свідчить про їхню неспроможність переносити знання за межі навчального розподілу.

Порівняння стабільності детекторів у розрізі доменів (неформальний Reddit та структурована Wikipedia) підкреслює різну чутливість архітектур до інформаційного шуму та формальності. На рис. 3 візуалізовано показники F1 для класу Machine, а в табл. 3 наведено детальні значення Accuracy, Precision та Recall.

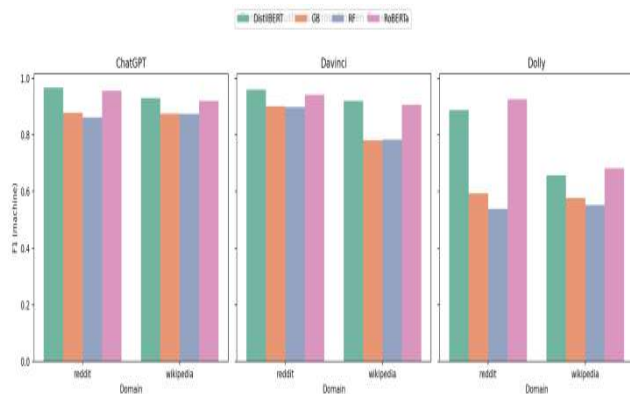


Рис. 3. Порівняння метрики F1 за доменами для різних генераторів

Результати експерименту свідчать, що в умовах генераторного зсуву моделі в більшості випадків демонструють вищі показники на домені Reddit порівняно з доменом Wikipedia. Трансформерні детектори (DistilBERT, RoBERTa) характеризуються високою робастністю, що проявляється у стабільно високих значеннях метрики F1 у домені Reddit. Натомість на

енциклопедичних текстах для стилеметричного ансамблю Gradient Boosting у сценарії logo_dolly спостерігається суттєве зниження якості детекції, що зумовлено погіршенням здатності моделі виявляти згенеровані тексти.

Таблиця 3 – Показники якості моделей за доменами

Сценарій	Домен	Модель	Accuracy	Precision	Recall
ChatGPT	Reddit	DistilBERT	0.9660	0.9408	0.9946
ChatGPT	Wiki	DistilBERT	0.9276	0.9052	0.9556
ChatGPT	Reddit	GB	0.8775	0.8763	0.8791
ChatGPT	Wiki	GB	0.8707	0.8419	0.9128
ChatGPT	Reddit	RF	0.8634	0.8689	0.8560
ChatGPT	Wiki	RF	0.8699	0.8456	0.9052
ChatGPT	Reddit	RoBERTa	0.9533	0.9157	1.0000
ChatGPT	Wiki	RoBERTa	0.9132	0.8589	0.9909
Davinci	Reddit	DistilBERT	0.9580	0.9263	0.9957
Davinci	Wiki	DistilBERT	0.9154	0.8706	0.9776
Davinci	Reddit	GB	0.8990	0.8788	0.9258
Davinci	Wiki	GB	0.7935	0.8331	0.7342
Davinci	Reddit	RF	0.8961	0.8750	0.9244
Davinci	Wiki	RF	0.7958	0.8317	0.7418
Davinci	Reddit	RoBERTa	0.9390	0.8927	0.9986
Davinci	Wiki	RoBERTa	0.8982	0.8382	0.9882
Dolly	Reddit	DistilBERT	0.8929	0.9333	0.8469
Dolly	Wiki	DistilBERT	0.7297	0.8230	0.5477
Dolly	Reddit	GB	0.6820	0.8204	0.4662
Dolly	Wiki	GB	0.6760	0.7579	0.4657
Dolly	Reddit	RF	0.6529	0.8017	0.4061
Dolly	Wiki	RF	0.6657	0.7549	0.4367
Dolly	Reddit	RoBERTa	0.9258	0.9254	0.9269
Dolly	Wiki	RoBERTa	0.7356	0.7925	0.6024

Перевірка залежності якості детекції від обсягу контексту виявила відмінності в поведінці моделей залежно від довжини тексту. Для цього тестову вибірку було поділено на кошики за довжиною (B2: 101–200 слів, B3: 201–400 слів, B4: понад 400 слів). Загальну динаміку метрик для всіх досліджуваних моделей відображено на рис. 4, тоді як у табл. 4 наведено деталізовані числові результати для двох репрезентативних моделей, а саме, DistilBERT і Random Forest, які представляють відповідно трансформерний і класичний стилеметричний підходи.

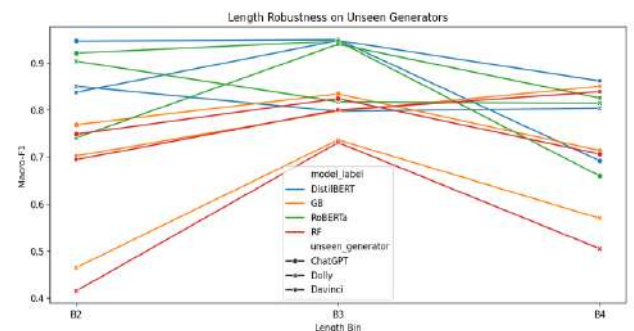


Рис. 4. Зміна метрики Macro-F1 залежно від довжини тексту (Bin Analysis)

Таблиця 4 – Результати оцінювання моделей у розрізі довжини тексту

Група	Модель	Precision	Recall	F1
B2	DistilBERT	0.870±0.017	0.993±0.006	0.927±0.012
	RF	0.667±0.007	0.603±0.016	0.633±0.012
B3	DistilBERT	0.964±0.008	0.978±0.006	0.971±0.003
	RF	0.892±0.001	0.899±0.003	0.895±0.002
B4	DistilBERT	0.294±0.031	0.829±0.029	0.433±0.03
	RF	0.325±0.008	0.743±0.000	0.452±0.008

На коротких текстах (B2) класичні моделі (RF) демонструють низькі значення метрики Recall (0.603). Із збільшенням обсягу тексту (B3) якість класифікації покращується, що пов'язано з накопиченням статистичних характеристик, необхідних для оцінювання лексичного різноманіття. Водночас для довгих текстів (B4) спостерігається суттєве зниження метрики Precision як для класичних, так і для трансформерних моделей (до 0.294 для DistilBERT та 0.325 для RF). Це свідчить про зростання кількості хибно позитивних класифікацій, коли тексти, написані людиною, помилково визначаються як згенеровані. Для трансформерних моделей така поведінка може бути пов'язана з обмеженням максимальної довжини контексту (512 токенів), що призводить до втрати частини релевантної інформації під час обробки довгих текстів. У результаті детектори можуть некоректно інтерпретувати структурні характеристики довгих текстів, що негативно впливає на якість класифікації.

Окремим важливим аспектом є аналіз хибно негативних помилок. Аналіз абсолютної кількості хибно негативних помилок (False Negatives), коли згенерований текст пропускається класифікатором і позначається як людський, є ключовим для розуміння деградації стиліметричних підходів. На рис. 5 наведено розподіл таких помилок.

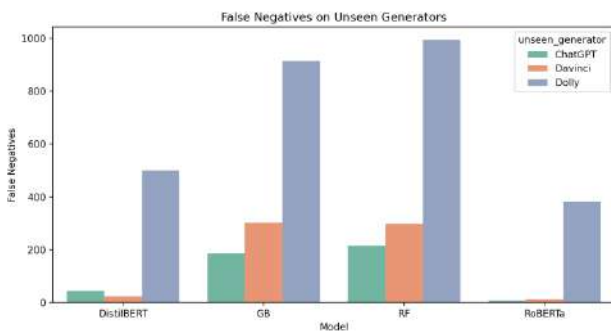


Рис. 5. Абсолютна кількість хибнонегативних помилок у різних моделях

Графік наочно підтверджує, що головною причиною деградації класичних алгоритмів є суттєве зростання кількості пропусків машинного тексту. У сценарії з моделлю Dolly стиліметричні ансамблі (GB, RF) генерують від 500 до майже 1000 хибнонегативних відповідей, тоді як трансформери (DistilBERT, RoBERTa) мінімізують цей показник. Зіткнувшись з новою LLM, класичний детектор не знаходить звичних статистичних відхилень і класифікує текст як людський.

Для пояснення механіки перенавчання (overfitting) стиліметричних ансамблів ми проаналізували зсув важливості ознак (Feature Importance Shift) між сценаріями LOGO. Візуалізація цього процесу представлена на рис. 6 та в табл. 5.

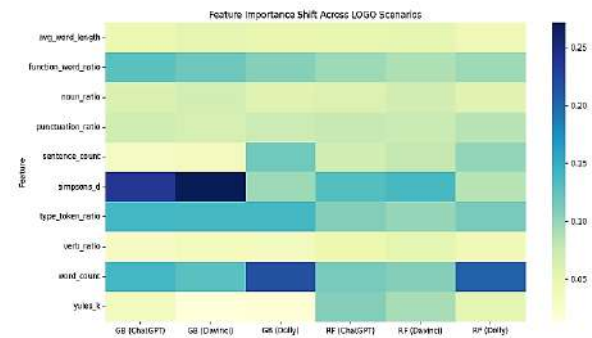


Рис. 6. Теплова карта зсуву важливості стиліметричних ознак між сценаріями

Таблиця 5 – Топ-3 найважливіших ознак для алгоритму Gradient Boosting за сценаріями

Сценарій	Топ-1	Топ-2	Топ-3
ChatGPT	simpsons_d (0.237)	word_count (0.141)	type_token_ratio (0.141)
Davinci	simpsons_d (0.271)	type_token_ratio (0.140)	word_count (0.129)
Dolly	word_count (0.218)	type_token_ratio (0.140)	sentence_count (0.117)

У сценаріях, де алгоритми навчалися і тестувалися в межах екосистеми OpenAI (ChatGPT, Davinci), домінуючою ознакою для прийняття рішення був індекс лексичного різноманіття Сімпсона (simpsons_d), вагове значення якого сягало 0.271. Це свідчить про те, що моделі відображають специфічні закономірності словникового розподілу, характерні для текстів, згенерованих моделями типу GPT. Водночас у сценарії, де невідомим генератором виступає Dolly, значущість цієї ознаки суттєво знижується (до 0.097), що вказує на втрату її дискримінаційної здатності.

За відсутності стабільних індикаторів детектори переорієнтовуються на більш загальні поверхневі характеристики, зокрема кількість слів (word_count = 0.218) та речень. Оскільки такі ознаки не є надійними маркерами штучного походження тексту, це призводить до зниження якості класифікації.

Висновки. У роботі реалізовано відтворений експеримент для оцінювання змін якості детекторів в умовах появи невідомого генератора. Дослідження базується на застосуванні протоколу LOGO та охоплює дві модельні парадигми, а саме класичні стиліметричні підходи і трансформерні encoder-детектори.

Результати дослідження підтверджують вищу здатність трансформерних моделей до узагальнення в умовах появи невідомого генератора. Водночас стиліметричні моделі демонструють суттєве зниження ефективності, що пов'язано з їхньою залежністю від поверхневих характеристик тексту, які не забезпечують стабільності при зміні генератора.

Ключовим фактором деградації класичних підходів є зростання кількості хибно негативних помилок, коли згенерований текст класифікується як людський. Такий тип помилок безпосередньо знижує практичну придатність детекторів

у реальних умовах застосування. Ризики їх деградації детекторів і значущість помилок обох типів також відзначаються у дослідженнях, присвячених протидії нейро-фейкам [12].

Дослідження має низку обмежень, пов'язаних із вибором генераторів і доменів, а також із використанням обмеження довжини контексту для трансформерних моделей. Крім того, не розглядалися сценарії часткового або змішаного авторства в межах одного документа.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення множини генераторів, залучення багатомовних даних та аналіз гібридних підходів до детекції. Як перспективний напрям можна розглядати підходи, що не потребують навчання з учителем і базуються на аналізі властивостей ймовірного простору мовних моделей, зокрема DetectGPT[13].

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори використовували ChatGPT та Gemini для перевірки граматики та орфографії, перекладування та переформулювання тексту. Після використання цих інструментів/сервісів автори перевірили та відредагували вміст за необхідності та несуть повну відповідальність за зміст публікації.

References

- Wang Y., Mansurov J., Ivanov P., et al. M4: Multi-Generator, Multi-Domain, and Multi-Lingual Black-Box Machine-Generated Text Detection. *EACL 2024*. 2024. Available at: <https://aclanthology.org/2024.eacl-long.83.pdf> (accessed 05.03.2026).
- Schuster T., Schuster R., Shah D. J., Barzilay R. The Limitations of Stylography for Detecting Machine-Generated Fake News. *Computational Linguistics*. 2020, vol. 46, no. 2, pp. 499–510. DOI: 10.1162/coli_a_00380.
- Pu X., Zhang J., Han X., Tsvetkov Y., He T. On the Zero-Shot Generalization of Machine-Generated Text Detectors. *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023*. 2023, pp. 4799–4808. DOI: 10.18653/v1/2023.findings-emnlp.318.
- Databricks. *Databricks Dolly (Dolly-v2)* — official repository/documentation. Available at: <https://github.com/databrickslabs/dolly> (accessed 05.03.2026).
- scikit-learn developers. *GroupShuffleSplit* — *scikit-learn documentation*. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.GroupShuffleSplit.htm (accessed 05.03.2026).
- imbalanced-learn developers. *Under-sampling — imbalanced-learn user guide (v0.14.1)*. Available at: https://imbalanced-learn.org/stable/under_sampling.html (accessed 05.03.2026).
- Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. *arXiv, Computer Science*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1910.01108. Available at: <https://arxiv.org/abs/1910.01108> (accessed 05.03.2026).
- Liu Y., Ott M., Goyal N., et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. *arXiv, Computer Science*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.11692. Available at: <https://arxiv.org/abs/1907.11692> (accessed 05.03.2026).
- Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001, vol. 45, pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324> (accessed 05.03.2026).
- Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*. 2001, vol. 29, no. 5, pp. 1189–1232. DOI: 10.1214/aos/1013203451. Available at: https://www.cse.cuhk.edu.hk/irwin.king/_media/presentations/2001_greedy_function_approximation_a_gradient_boosting_machine.pdf (accessed 05.03.2026).
- Zheng A., Casari A. *Feature Engineering for Machine Learning: Principles and Techniques for Data Scientists*. Sebastopol, O'Reilly Publ., 2018. Available at: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3239815> (accessed 05.03.2026).
- Zellers R., Holtzman A., Rashkin H., et al. Defending Against Neural Fake News. *arXiv, Computer Science*. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.12616. Available at: <https://arxiv.org/abs/1905.12616> (accessed 05.03.2026).
- Mitchell E., Lee Y., Khazatsky A., Manning C. D., Finn C. DetectGPT: Zero-Shot Machine-Generated Text Detection using Probability Curvature. *Proceedings of Machine Learning Research*. 2023, vol. 202. Available at: <https://proceedings.mlr.press/v202/mitchell23a.html> (accessed 05.03.2026).

Надійшла (received) 10.03.2026
 Прийнята (accepted) 30.03.2026
 Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.89:519.76

T. V. PETRYSHAK, Postgraduate Student at the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: taras.v.petryshak@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6296-3867>

V. A. VYSOTSKA, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; e-mail: Victoria.A.Vysotska@lpnu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-3689>

EVALUATING THE GENERALIZATION ABILITY OF AI-GENERATED TEXT DETECTORS TO UNSEEN GENERATORS

Many AI-generated text detectors demonstrate high performance on datasets constructed within typical evaluation protocols. In particular, classical models based on stylometric features, such as text length, punctuation patterns, and aggregated formality indicators, can effectively capture statistical regularities of machine generation. However, their performance decreases substantially when texts produced by previously unseen generators are encountered. Under such conditions, feature distributions shift, which leads to a decline in classification quality, primarily due to an increase in false negative errors. This paper investigates the generalization ability of detection models under conditions involving an unseen generator. The study compares classical stylometric models and transformer-based approaches using the LOGO (Leave-One-Generator-Out) evaluation protocol. The task is formulated as binary text classification across two domains, Reddit and Wikipedia, and involves three generators, namely ChatGPT, Davinci, and Dolly. The classical models include Random Forest and Gradient Boosting, whereas the transformer-based approaches are represented by DistilBERT and RoBERTa. Model performance is evaluated using Accuracy, Precision, Recall, F1, and Macro-F1, with the final results averaged across multiple random initializations. The results show that transformer-based models demonstrate a higher ability to generalize to texts produced by unseen generators. In contrast, stylometric approaches exhibit a substantial degradation in performance, particularly depending on the domain and text length. Error analysis indicates that the main factor behind this decline is the increase in false negative errors. An additional analysis of feature importance shows that classical models rely heavily on surface-level textual characteristics, which do not ensure stable generalization across different generators. Therefore, the findings highlight the importance of evaluating AI-generated text detectors under the LOGO protocol to ensure robust performance in the presence of new language models.

Keywords: AI-generated text detection, generalization ability, unseen generator, stylometric features, transformer-based models, text classification.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Петришак Тарас Володимирович / Petryshak Taras Volodymyrovych

Автор 2 / Author 2: Висоцька Вікторія Анатоліївна / Vysotska Viktoriia Anatoliivna

О. О. ХОЛОДНЯК, аспірант, кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: o.o.kholodniak@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1012-7361>

О. В. ПРОХОРОВ, доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: o.prokhorov@khai.edu; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4680-4082>

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИМИ НАВЧАЛЬНИМИ ТРАЕКТОРІЯМИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНОГО IRT-FORGETTING ПІДХОДУ

Незважаючи на широке впровадження сучасних систем управління навчанням, більшість таких систем спрямовано на організацію доступу до контенту й оцінювання результатів, проте поза увагою залишається формалізоване моделювання індивідуальних навчальних підходів і динаміки забування знань. У роботі представлено комплекс моделей і методів для адаптивного навчання, розроблений у межах платформи FAHRAI (Framework for Adaptive Hierarchical Review and Instruction). Запропоновано такі основні компоненти: (1) інтегрована модель, що мультиплікативно поєднує двопараметричну модель теорії відгуку на завдання (IRT 2PL) із функцією утримання в пам'яті й забезпечує покращену калібрацію порівняно з класичною IRT; (2) динамічна модель стабільності пам'яті з композитним показником якості відповіді й контекстно-залежним множником; (3) метод ієрархічного відбору навчальних завдань із багаторівневою системою стратегій і контекстно-залежними вагами композитного бала пріоритизації; (4) метод застосування довірчого інтервалу Вілсона для статистично надійного оцінювання рівня засвоєння знань, що суттєво знижує частку хибнопозитивних рішень порівняно з наївною точністю; (5) композитна метрика готовності, що інтегрує параметри IRT, утримання в пам'яті знань і статистичну надійність оцінки. Для кожної моделі наведено формальний опис, теоретичне обґрунтування й числові приклади. Запропонований комплекс моделей і методів формує цілісну теоретичну основу для побудови адаптивних систем навчання, що дає змогу підвищити точність прогнозування навчальних результатів, ефективність планування повторень і надійність оцінювання індивідуального прогресу учнів.

Ключові слова: персоналізовані навчальні траєкторії, адаптивне навчання, теорія відгуку на завдання, інтервальне повторення, зона найближчого розвитку, довірчий інтервал Вілсона, персоналізація навчання.

1. Вступ. Результати дослідження PISA-2022 свідчать про те, що 31 % учнів у країнах ОЕСР не досягають базового рівня математичної грамотності [1]. Ця тенденція вказує на системну неефективність традиційних підходів до навчання й підкреслює необхідність адаптивних технологій. Метааналіз К. ВанЛена [2] продемонстрував ефективність інтелектуальних систем навчання, засвідчивши при цьому перевагу над індивідуальним репетиторством ($d = 0.76$) і традиційними технологіями. Сучасні системи управління навчанням (Learning Management System, LMS) переважно орієнтовані на підхід «one-size-fits-all» [2], забезпечуючи уніфіковану подачу навчального контенту без глибокої адаптації до індивідуальних характеристик здобувачів освіти та ігноруючи при цьому три головні висновки когнітивної науки. По-перше, не береться до уваги концепція зони найближчого розвитку ZPD (Zone of Proximal Development) Л. Виготського [3], згідно з якою освітній процес є найбільш ефективним, коли рівень складності навчальних завдань помірно перевищує рівень поточної компетентності учня. По-друге, поза увагою залишаються фундаментальні закономірності когнітивної психології, зокрема крива забування Г. Еббінгауза [4, 5], графік якої підтверджує, що інформація із часом втрачається з пам'яті, передусім за відсутності повторень і практичного значення здобутих знань. Цей принцип підтверджено метааналізом Н. Чепеди й співавторів [6], які на основі 317 експериментів довели ефективність розподілених повторень ($d = 0.46$) на закріплення знань. По-третє, не враховується потреба в статистично достовірному оцінюванні рівня знань в умовах недостатньої кількості спостережень [7, 8].

Наявні адаптивні платформи реалізують лише окремі аспекти персоналізації: IRT-платформи не враховують забування, системи інтервального повторення, як-от SM-2 [9], не моделюють рівень знань учня, а статистичні методи оцінювання не інтегровані з когнітивними моделями. Така фрагментованість обмежує ефективність кожного підходу окремо.

2. Огляд літератури та постановка проблеми.

Формалізація ZPD за допомогою IRT. Концепція зони найближчого розвитку [3] визначає оптимальний діапазон складності завдань для навчання. С. Чайклін [10] довів, що операціоналізація цього підходу потребує кількісного апарату (зокрема, такий як IRT), що дає змогу одночасно моделювати рівень знань учня і складність завдання. Платформа IRT [11, 12] забезпечує відповідний формальний апарат: у двопараметричній моделі (2PL) зона найближчого розвитку ZPD задається через параметр складності, адаптований до поточного рівня здібностей, тобто, що відповідає принципу бажаних труднощів (desirable difficulties) [13]. Сучасні дослідження доводять, що моделі глибокого відстеження знань (Deep Knowledge Tracing) можна розглядати як неявну реалізацію динамічної багатовимірної моделі IRT [22], що додатково обґрунтовує доцільність використання IRT як основи для адаптивних систем навчання. Проте класична IRT є статичною, оскільки не враховує динаміку забування інформації між навчальними сесіями.

Моделі забування та інтервальне повторення. Крива забування Г. Еббінгауза [4], дані якої було підтверджено реплікацією Мюрре й Дроса [5], описує експоненціальний характер зниження рівня утримання

© Холодняк О. О., Прохоров О. В., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПІ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



знань у пам'яті: Г. Роедігер і Д. Карпіке [14] встановили, що тестування (ефект тестування) є більш ефективним, ніж повторне читання. Модель SM-2 [9] оснований на дискретній шкалі й лінійному оновленні фактора складності, а алгоритм FRSRS (Free Spaced Repetition Scheduler) [15] – на безперервній DSR-моделі, формальне обґрунтування й оптимізацію якої через стохастичний алгоритм найкоротшого шляху наведено в роботі Дж. Є та співавторів [21]. Сучасні розширення цього напрямку, зокрема LECTOR [20], інтегрують методи великих мовних моделей для семантичного аналізу понять. Проте жодна із цих моделей не інтегрована з IRT.

Статистичне оцінювання прогресу. Довірчий інтервал Вілсона [7] забезпечує достовірність оцінювання біноміальної частки за малих вибірок. Дослідження А. Агресті й В. Коулла [8], Л. Брауна та ін. [15] підтвердили переваги цього методу для практичних застосувань над інтервалом Вальда й іншими підходами.

Проблема фрагментованості. Спільним недоліком наявних підходів є фрагментованість: IRT-платформи не враховують забування, системи інтервального повторення не моделюють рівень учня, а статистичні методи оцінювання не інтегровані з когнітивними моделями. Наша платформа Framework for Adaptive Hierarchical Review and Instruction (FAHRAI) пропонує інтегрований підхід, що об'єднує ці компоненти в комплекс формальних моделей.

3. Мета та завдання дослідження. Метою цієї роботи є вирішення проблеми фрагментованості наявних підходів шляхом розроблення інтегрованого комплексу формальних моделей і методів адаптивного навчання. Для досягнення цієї мети сформульовано такі завдання:

- розробити інтегровану модель оцінювання ймовірності правильної відповіді, що поєднує двопараметричну модель теорії відгуку на завдання (IRT 2PL) із функцією утримання інформації в пам'яті в межах комплексу формальних моделей;
- розробити динамічну модель стабільності пам'яті, що адаптивно оновлює параметри повторення на основі композитного індикатора якості відповіді з огляду на контекстуальні фактори;
- обґрунтувати й формалізувати метод багаторівневого ієрархічного відбору навчальних завдань, що використовує контекстно-залежні ваги композитного індексу пріоритизації;
- обґрунтувати застосування довірчого інтервалу Вілсона для статистично надійного оцінювання засвоєння навчального матеріалу в адаптивних системах навчання;
- розробити інтегровану метрику готовності до підсумкового оцінювання, що поєднує оцінювання рівня знань на основі IRT, динаміку утримання інформації в пам'яті й статистичну надійність оцінювання.

Матеріали та методи дослідження. У роботі досліджуються процеси адаптивного управління персоналізованими навчальними траєкторіями та розробляються методи і моделі їх інтелектуального управління, реалізовані в платформі FAHRAI.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що інтеграція психометричних моделей (IRT 2PL), когнітивних моделей забування (експоненціальна крива забування)

й статистичних методів оцінювання прогресу (довірчий інтервал Вілсона) у єдиний комплекс формальних моделей забезпечить підвищення точності та надійності оцінювання і прогнозування в адаптивному навчанні порівняно з їх фрагментарним застосуванням.

У дослідженні були використані такі методи й теоретичні засади:

Теорія відгуку на завдання (IRT, модель 2PL) [11, 12] – для формалізації зони найближчого розвитку й оцінювання латентного параметра здібностей θ . Двопараметрична модель вибрана завдяки балансу між описовою потужністю та ідентифікованістю параметрів.

Експоненціальна крива забування [4, 5] – для моделювання динаміки утримання інформації в пам'яті $R(t) = R_0 \cdot e^{-t/S}$, де $R(t) \in [0; 1]$ – частка раніше засвоєної інформації, що зберігається в пам'яті в момент часу t (у днях) від останнього успішного повторення; $R_0 = R(0) = 1$ – початкове значення утримання одразу після повторення; t – час (у днях), що минув від останнього повторення; S – параметр стабільності пам'яті (у днях), який динамічно оновлюється після кожної взаємодії та визначає швидкість забування.

Довірчий інтервал Вілсона [7, 8] – для статистично надійного оцінювання рівня засвоєння за малих вибірок, що забезпечує коректне покриття довірчого інтервалу на відміну від класичного методу Вальда.

Ієрархічна багатокритеріальна оптимізація – для формалізації задачі відбору завдань як упорядкованої за пріоритетом послідовності перевірок стратегій із композитним індексом пріоритизації.

Числове моделювання – для верифікації теоретичних властивостей запропонованих моделей через обчислювальні приклади з конкретними значеннями параметрів.

Апробацію запропонованих моделей було проведено в мережі автошкіл, де платформа FAHRAI використовувалася для підготовки до теоретичного іспиту з правил дорожнього руху. Такі аспекти, як структурована база знань (правила дорожнього руху), наявність стандартизованого оцінювання (офіційний іспит) і студентська аудиторія з різним рівнем базової підготовки, темпами навчання й когнітивними особливостями, дали змогу вибрати цю предметну область для дослідження.

4. Результати.

4.1 Концепція адаптивного навчання FAHRAI.

Замкнений цикл адаптації. Платформа FAHRAI реалізує замкнений цикл адаптивного навчання із чотирма фазами: **Фаза оцінювання.** Поточний стан знань студента визначається шляхом інтегрованого аналізу трьох вимірів: параметра здібностей θ з моделі IRT, рівня утримання знань R із кривої забування й статистично надійної оцінки засвоєння p^- за методом Вілсона.

Фаза відбору. На основі результатів оцінювання вибирається оптимальне навчальне завдання через ієрархію пріоритетів.

Фаза взаємодії. Вибране завдання надається студенту, відповіді збираються разом із метаданими: правильність, час відповіді й суб'єктивний рівень упевненості.

Фаза оновлення. Оновлюються всі параметри моделі студента: θ через IRT, стабільність S через модель динамічної стабільності та p^- шляхом додавання нового спостереження. Загальний цикл описується як перехід станів:

$$State_{t+1} = f(State_t, Task_t, Response_t),$$

де $State_t$ – вектор стану моделі студента на кроці t ; $Task_t$ – вибране завдання; $Response_t$ – результат відповіді. Адаптація відбувається після кожної взаємодії.

Модульна архітектура. Архітектура FAHRAI побудована на принципі модульності. Платформа складається із шести концептуальних модулів.

Модуль 1: аналізатор стану (State Analyzer). Підтримує актуальну модель знань студента. Після кожної відповіді оновлює параметр здібностей θ із моделі IRT, рівень утримання R і нижню межу Вілсона p^- . Вихідний вектор стану:

$$State(s, j) = (\theta_s, R_j(t), p_j^-, n_j, k_j, S_j, t_j^{last}),$$

де θ_s – параметр здібностей студента s ; $R_j(t)$ – рівень утримання для теми j у момент часу t ; p^- – нижня межа Вілсона; n_j – кількість спроб; k_j – кількість правильних відповідей; S_j – стабільність пам'яті, t_j^{last} – час останньої взаємодії. Цей модуль слугує спільним інтерфейсом для всіх інших модулів.

Модуль 2: селектор завдань (Task Selector). Реалізує ієрархічний метод відбору, послідовно перевіряючи стратегії та виконуючи ранжування кандидатів за композитним балом:

$$Priority = w_c \cdot C + w_g \cdot G + w_t \cdot T + w_k \cdot K + w_p \cdot P.$$

Модуль 3: планувальник повторень (Repetition Scheduler). Оновлює стабільність S через модель динамічної стабільності, обчислює оптимальний інтервал $I = -S \cdot \ln(R_{target})$ і підтримує чергу пріоритетів повторень.

Модуль 4: оцінювач прогресу (Progress Evaluator). Обчислює p^- за методом Вілсона й визначає засвоєння за подвійним критерієм: $p^- \geq 0.70$ та $n \geq 5$. Обчислює швидкість навчання $LV = \Delta p^- / \Delta t$ та інтегральний бал упевненості CS .

Модуль 5: механізм персоналізації (Personalization Engine). Адаптує параметри до індивідуальних характеристик студента: ширину ZPD Δ_{ZPD} , цільове утримання R_{target} і темп навчання.

Модуль 6: предиктор готовності (Readiness Predictor). Обчислює інтегровану оцінку готовності до підсумкового оцінювання.

Синергія модулів. Фундаментальна перевага архітектури FAHRAI полягає в узгодженій взаємодії її модулів:

State Analyzer надає Task Selector багатовимірну картину, що охоплює рівень знань θ , ступінь забування R і надійність оцінки p^- .

Repetition Scheduler використовує параметр θ для визначення початкової стабільності нових тем, відображаючи вплив попередніх знань на швидкість забування [16].

Progress Evaluator формує консервативну оцінку параметра p^- , яка запобігає передчасним переходам на основі статистично недостатніх даних.

Personalization Engine адаптує параметри всіх інших модулів: ширину ZPD, цільове утримання й темп навчання.

Readiness Predictor інтегрує виходи всіх модулів у єдину прогностичну метрику.

Теоретичний аналіз указує на суперадитивний ефект інтеграції: сума внесків окремих компонентів є меншою за внесок інтегрованої системи, що зумовлено узгодженим використанням вихідних даних кожного модуля іншими модулями.

4.2 Інтегрована модель IRT-утримання.

Двопараметрична модель IRT і формалізація ZPD. У двопараметричній моделі IRT (2PL) імовірність правильної відповіді визначається як

$$P_{IRT}(\theta, b, a) = \frac{1}{1 + e^{-a(\theta - b)}},$$

де θ – латентний параметр здібностей студента, $\theta \in [-3, 3]$; b – складність завдання; $a > 0$ – дискримінативність. Коли $\theta = b$, імовірність правильної відповіді дорівнює 0.5.

Зона найближчого розвитку формалізується через цільову складність:

$$b^* = \theta + \Delta_{ZPD},$$

де $\Delta_{ZPD} \in [0.05, 0.10]$ логітів відповідає ймовірності правильної відповіді 48–49 %, що узгоджується з принципом бажаних труднощів (desirable difficulties) [13]. Параметр Δ_{ZPD} є адаптивним і регулюється модулем персоналізації.

На рис. 1 показано характеристичні криві завдань: завдання з вищим параметром a мають більш стрімкі криві (вони краще розрізняють студентів поблизу порогового значення b), тоді як завдання з вищим параметром b зміщені вправо.

Інформативність завдання для вимірювання параметра θ визначається функцією інформації:

$$I(\theta) = a^2 \cdot P(\theta) \cdot (1 - P(\theta)).$$

Максимальна інформація досягається, якщо $\theta = b$, де невизначеність щодо результату є найвищою.

Інтегрована модель. Центральна теоретична інновація FAHRAI – це інтегрована модель IRT–forgetting, яка поєднує IRT із динамікою забування в єдиному предикторі ймовірності правильної відповіді:

$$P(correct | \theta, b, a, R) = R \cdot P_{IRT}(\theta, b, a) + (1 - R) \cdot P_{guess},$$

де $R = R_0 \times e^{-t/S}$ – рівень утримання згідно з кривою забування; P_{guess} – імовірність угадування (залежить від типу завдання).

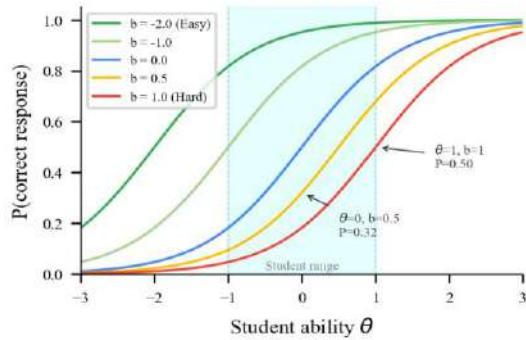


Рис. 1. Характеристичні криві завдань у моделі IRT 2PL ($a = 1.5$)

Інтерпретація моделі є прозорою: з імовірністю R студент утримає інформацію в пам'яті – це означає, що шанс правильної відповіді визначається моделлю IRT; з імовірністю $(1 - R)$ інформацію студент забуде – із цього виходить, що йому доведеться лише вгадувати.

Модель відображає когнітивну реальність: студент із високим параметром θ може помилитися через забування ($R \rightarrow 0$), водночас студент із низьким параметром θ може вгадати правильно, навіть якщо забув інформацію.

Числовий приклад. Розглянемо студента з такими параметрами: $\theta = 1.5$ та завдання з $b = 1.2$, $a = 1.0$. Імовірність за IRT:

$$P_{\text{IRT}} = \frac{1}{1 + e^{-1.0(1.5-1.2)}} = \frac{1}{1 + e^{-0.2}} = 0.574.$$

Новий матеріал ($R = 0.95$, тест із множинним вибором, $P_{\text{guess}} = 0.25$):

$$P = 0.95 \times 0.574 + 0.05 \times 0.25 = 0.558.$$

Після тривалої перерви ($R = 0.061$):

$$P = 0.061 \times 0.574 + 0.939 \times 0.25 = 0.270.$$

Статична IRT прогнозувала б $P = 0.574$ в обох випадках, значно завищуючи ймовірність після тривалої перерви. Інтегрована модель коректно відображає зменшення ймовірності з 0.558 до 0.270.

На рис. 2 показано криві забування: якщо $S = 1$ день, то рівень утримання інформації знижується до 0.37 протягом першої доби, а якщо $S = 10$ днів – лише до 0.90.

Теоретичні переваги інтегрованої моделі. Інтегрована модель теоретично перевершує як статичну IRT, так і лінійну комбінацію підходів IRT та моделі забування (IRT-forgetting). Мультиплікативна структура $R \cdot P_{\text{IRT}} + (1 - R) \cdot P_{\text{guess}}$ має суттєву перевагу над адитивною: вона коректно моделює механізм забування як «фільтр», через який проходить здібність. Коли $R = 1$, модель зводиться до класичної IRT, а коли

$R = 0$ – до базової ймовірності вгадування. Порівняльний аналіз із чотирма альтернативними моделями (статична IRT, лише модель забування, лінійна комбінація та інтегрована модель) підтверджує перевагу запропонованого підходу щодо дискримінативної здатності й калібрування.

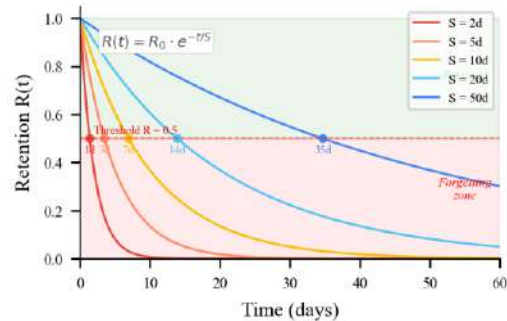


Рис. 2. Криві забування для різних значень стабільності S

На рис. 3 візуалізовано теоретичну розбіжність між моделями: найбільша відмінність спостерігається за тривалих інтервалів із моменту останнього повторення, де статична модель IRT систематично завищує ймовірність.

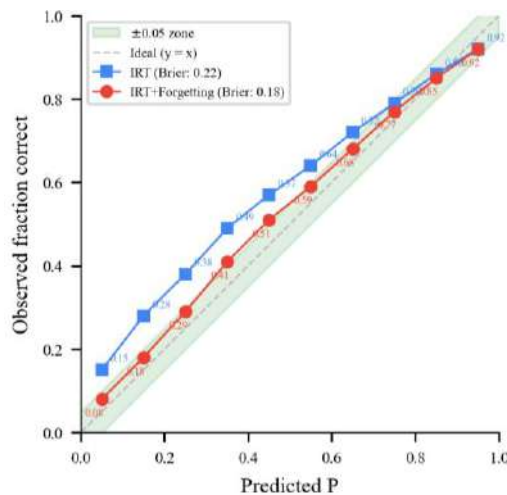


Рис. 3. Порівняння прогнозів інтегрованої моделі IRT-forgetting та статичної IRT

Оновлення параметра здібностей. Параметр θ оновлюється після кожної відповіді через адаптивний механізм: після правильної відповіді θ зростає пропорційно до несподіваності успіху (правильна відповідь на складне завдання дає більший приріст), а після неправильної – спадає. Швидкість оновлення зменшується зі зростанням кількості спостережень, забезпечуючи стабілізацію θ за умови достатнього обсягу даних.

4.3 Модель динамічної стабільності пам'яті.

Мотивація. Класична крива забування з фіксованою стабільністю S не враховує того, що S змінюється з кожним повторенням: успішне повторення покращує пам'ять, тоді як неуспішне – послаблює її. Модель SM-2 [9] використовує дискретну шкалу й лінійні оновлення. У алгоритмі FRSR [21] запропоновано неперервну модель DSR, але без інтеграції з IRT. Модель динамічної стабільності пам'яті FAHRAI

поєднує переваги обох підходів, інтегруючи оновлення стабільності з параметрами IRT.

Оновлення стабільності. Після успішного повторення стабільність оновлюється:

$$S_{\text{new}} = S_{\text{old}} \cdot (1 + \eta \cdot q \cdot \text{multiplier}(t, S_{\text{old}})),$$

де $\eta > 0$ – базова швидкість навчання; $q \in [0, 1]$ – показник якості відповіді; *multiplier* – контекстно-залежний множник.

Показник якості відповіді. Якість відповіді обчислюється як зважена сума трьох компонентів:

$$q = w_c \cdot c + w_t \cdot t_{\text{norm}} + w_{\text{conf}} \cdot \text{conf},$$

де $c \in \{0, 1\}$ – правильність відповіді; $t_{\text{norm}} = \max(0, 1 - t_{\text{resp}} / t_{\text{max}})$ – нормалізований час відповіді; *conf* $\in [0, 1]$ – самооцінка впевненості. Правильність відповіді c має найвищу вагу як найбільш інформативний показник стану знань. Час відповіді відображає ступінь автоматизації навички [14]. Самооцінка впевненості додає інформацію про метакогнітивний стан студента [17].

Контекстний множник. Множник визначає ефективність повторення залежно від рівня утримання знань на момент повторення:

$$\text{multiplier}(t, S_{\text{old}}) = \begin{cases} \alpha_{\text{early}}, & \text{if } R(t) > R_{\text{high}} \text{ (early repetition),} \\ 1.0, & \text{if } R(t) \in [R_{\text{low}}, R_{\text{high}}], \\ & \text{(optimal window)} \\ \alpha_{\text{late}}, & \text{if } R(t) < R_{\text{low}} \text{ (late repetition),} \end{cases}$$

де $0 < \alpha_{\text{late}} < \alpha_{\text{early}} < 1$.

Три зони мають когнітивну інтерпретацію. Коли $R > R_{\text{high}}$ (раннє повторення), ефект зміцнення обмежений ефектом стелі (ceiling effect). Коли $R \in [R_{\text{low}}, R_{\text{high}}]$ (оптимальне вікно), пригадування потребує зусиль, але все ще є можливим, що максимізує ефект тестування (testing effect) [14]. Коли $R < R_{\text{low}}$, інформація значною мірою забута й потребує повторного вивчення.

Неуспішні відповіді. Для неуспішних відповідей ($c = 0$) стабільність зменшується:

$$S_{\text{new}} = \max(S_{\text{min}}, S_{\text{old}} \cdot (1 - \lambda \cdot (1 - q))),$$

де $\lambda \in (0, 1)$ – коефіцієнт зменшення стабільності в разі помилки; S_{min} – мінімальне значення, яке запобігає колапсу до нульових інтервалів.

Початкова стабільність. Для нових тем початкова стабільність ураховує загальний рівень підготовки студента:

$$S_0 = S_{\text{base}} \cdot \max(0.5, \min(2.0, \theta / b_{\text{avg}})),$$

де S_{base} – базова стабільність для студента середнього рівня; b_{avg} – середня складність завдань для теми. Студенти з вищим параметром θ отримують більшу початкову стабільність, що відображає вплив попередніх знань на швидкість забування [16].

Метод інтервального повторення. Оптимальний інтервал до наступного повторення визначається аналітично:

$$I = -S \cdot \ln(R_{\text{target}}).$$

Цільове утримання R_{target} є адаптивним:

$$R_{\text{target}}(q) = R_{\text{base}} + \delta \cdot (q - 0.5),$$

де R_{base} – базове цільове утримання; δ – коефіцієнт адаптації. Після високоякісної відповіді R_{target} зростає і повторення відкладається далі, а після низькоякісної – спадає і повторення наближається.

На рис. 4 показано, як стабільність S зростає з кожним успішним повторенням, тоді як рівень утримання R коливається між повтореннями.

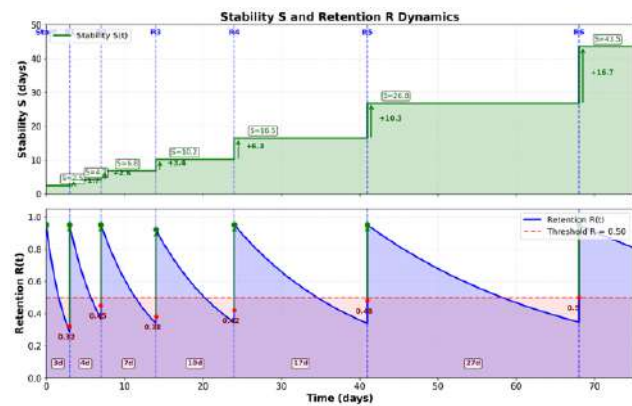


Рис. 4. Динаміка стабільності S та утримання R під час послідовних повторень

Теоретичне порівняння з наявними підходами вказує на те, що модель динамічної стабільності пам'яті FANRAI має структурні переваги над SM-2 (неперервна модель замість дискретної, інтеграція з IRT) та над FRSR (контекстно-залежний множник, композитний показник якості).

4.4 Ієрархічний відбір завдань.

Мотивація ієрархічного підходу. Відбір оптимального навчального завдання є центральною проблемою адаптивної системи. Наївний підхід – завжди вибирати завдання в ZPD – не враховує необхідності повторення, ремедіації, дотримання пререквізитів і підтримання мотивації.

Метод відбору завдань FANRAI розв'язує цю задачу багатокритеріальної оптимізації через ієрархію пріоритетів: перш ніж рухатися вперед (ZPD), необхідно забезпечити міцність фундаменту (пререквізити, утримання). Формально визначається послідовність перевірок C_1, C_2, \dots, C_K , де кожна C_i визначає, чи наявні завдання, що задовольняють умови відповідної стратегії. Активується перша стратегія (з найвищим пріоритетом), для якої знайдено кандидатів.

Стратегії відбору. Стратегія 1: перевірка пререквізитів. Пріоритет: найвищий. Умова: існує тема j , що є пререквізитом для поточного навчального

блоку, і $p_j^- < \tau_{pre}$ або $R_j(t) < R_{pre}$. Незасвоєні пререквизити суттєво знижують імовірність успішного засвоєння залежних тем [18].

Стратегія 2: критичне утримання. Пріоритет: високий. Умова: $R_j(t) \in [R_{low}, R_{high}]$ та $p_j^- \geq \tau_{pre}$. Цей діапазон утримання є оптимальним для повторення: пригадування потребує зусиль, але все ще є можливим, що максимізує ефект тестування [14].

Стратегія 3: ремедіація слабких місць. Пріоритет: середньо-високий. Умова: $p_j^- < \tau_{pre}$ та утримання є вищим за порогове значення. Проблема полягає в поверхневому початковому розумінні, а не в забуванні.

Стратегія 4: дослідження нового матеріалу. Пріоритет: середній. Частина сесії приділено темам із невеликою кількістю взаємодій для калібрування моделі IRT та підтримання мотивації через новизну.

Стратегія 5: кандидати ZPD. Пріоритет: середньо-низький. Умова: $b_j \in [\theta + \Delta_{ZPD} - \varepsilon, \theta + \Delta_{ZPD} + \varepsilon]$. Завдання в ZPD забезпечують оптимальне засвоєння нового матеріалу [3]. Порівняно низький пріоритет пояснюється тим, що продуктивне вивчення нового матеріалу можливе лише за умови забезпечення сформованої системи базових знань.

Стратегія 6: випадковий резерв. Пріоритет: найнижчий. Активується за відсутності кандидатів для інших стратегій.

На рис. 5 показано структуру ієрархії та послідовність перевірок.

Композитний бал пріоритизації. У межах активної стратегії виконується ранжування кандидатів за композитним балом:

$$Priority = w_c \cdot C + w_g \cdot G + w_t \cdot T + w_k \cdot K + w_p \cdot P,$$

де п'ять компонентів відображають різні аспекти пріоритету:

$$C = 1 - R(t) \text{ – критичність утримання;}$$

$$G = \exp\left(-\frac{(b - \theta - \Delta_{ZPD})^2}{2\sigma_{ZPD}^2}\right) \text{ – бал ZPD: гауссове}$$

ядро, що оцінює відповідність складності завдання зоні найближчого розвитку;

$$T = \max(0, 1 - R(t) / R_{target}) \text{ – часова терміновість;}$$

$$K = 1 - p^- \text{ – дефіцит знань;}$$

$$P \in \{0, 1\} \text{ – пріоритет пререквизитів.}$$

Контекстно-залежні ваги. Ваги компонентів залежать від активної стратегії (табл. 1). Для стратегії пререквизитів домінує w_p ; для критичного утримання – w_c і w_t ; для ремедіації – w_k ; для дослідження та ZPD – w_g . Стратегія випадкового резерву використовує рівномірні ваги.

Числовий приклад. Студент із $\theta = 1.0$, $\Delta_{ZPD} = 0.08$, $\sigma_{ZPD} = 0.35$. Завдання: $b = 1.1$, $R = 0.72$, $p^- = 0.65$. Стратегія – ZPD (5).

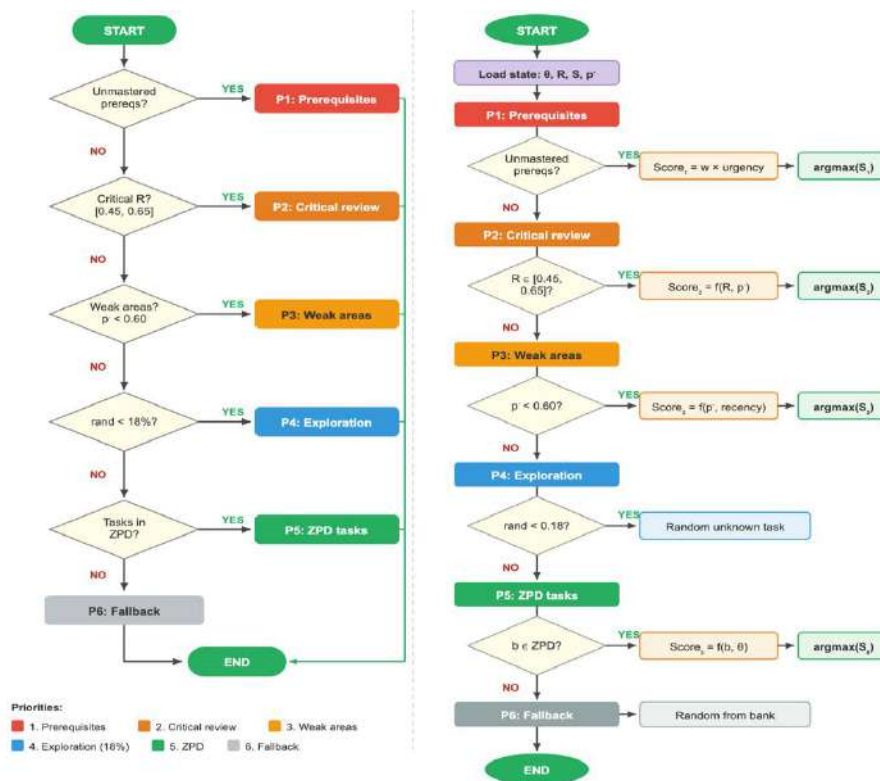


Рис. 5. Багаторівнева ієрархія стратегій та логіка відбору завдань

Обчислення компонентів: $C = 1 - 0.72 = 0.28$,
 $G = \exp(-(1.1 - 1.0 - 0.08)^2 / (2 \cdot 0.35^2)) = 0.998$,
 $T = \max(0, 1 - 0.72 / 0.85) = 0.153$, $K = 1 - 0.65 = 0.35$,
 $P = 0$. Композитний бал:

$$Priority = 0.10 \cdot 0.28 + 0.50 \cdot 0.998 + 0.10 \cdot 0.153 + 0.20 \cdot 0.35 + 0.10 \cdot 0 = 0.612.$$

Для порівняння: завдання з $b = 1.5$ (показник значно вищий за ZPD) має $G = 0.487$, що дає $Priority = 0.380$ – це показник є суттєво нижчим. Це демонструє ефективність гауссового ядра для фокусування відбору на завданнях оптимальної складності.

Таблиця 1 – Ваги композитного балу для різних стратегій

Стратегія	w_c	w_g	w_t	w_k	w_p
Пререквізити	0.10	0.05	0.10	0.25	0.50
Критичне утримання	0.40	0.10	0.30	0.15	0.05
Ремедіація	0.10	0.15	0.10	0.55	0.10
Дослідження	0.05	0.50	0.05	0.10	0.30
ZPD	0.10	0.50	0.10	0.20	0.10
Випадковий	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

4.5 Статистично надійне оцінювання прогресу (Wilson CI).

Проблема наївної точності. Показник $\hat{p} = c/n$ за умови малих n призводить до систематичних хибно-позитивних рішень. Студент із трьома правильними відповідями ($c = 3$) із чотирьох ($n = 4$) отримує $\hat{p} = 0.75$, хоча довірчий інтервал, що становить 95 %, має ширину, більшу за 0.50. В адаптивних системах хибно-опозитивне рішення про засвоєння призводить до передчасного переходу до наступних тем і накопичення прогалин у знаннях.

Довірчий інтервал Вілсона (Wilson confidence interval). FAHRAI використовує нижню межу довірчого інтервалу Вілсона [7]:

$$p^- = \frac{1}{1 + z^2/n} \left[\hat{p} + \frac{z^2}{2n} - z \sqrt{\frac{\hat{p} \cdot (1 - \hat{p})}{n} + \frac{z^2}{4n^2}} \right],$$

де $z = 1.96$ для 95 % рівня довіри. На відміну від інтервалу Вальда (Wald), метод Вілсона забезпечує коректне покриття навіть за умови екстремальних \hat{p} і малих n [8]. Значення p^- відповідає на запитання: яке найнижче значення справжньої ймовірності правильної відповіді узгоджується з даними?

Подвійний критерій засвоєння. Компонент знань (КЗ) вважається засвоєним, коли одночасно виконуються дві умови: $p^- \geq \tau_{mastery}$, та $n \geq n_{min}$.

Мінімальна вимога $n \geq n_{min}$ запобігає ухваленню рішень на основі обмежених даних. Порогове значення $p^- \geq \tau_{mastery}$ означає, що навіть у найгіршому статистично обґрунтованому випадку ймовірність правильної відповіді перевищує задане значення.

Динаміка засвоєння. Для унаочнення розглянемо типову траєкторію засвоєння (табл. 2). Якщо $n = 6$, то наївна точність $\hat{p} = 0.67$ може створити враження прогресу, але $p^- = 0.35$ – стверджувати про засвоєння зарано. Лише за достатньої кількості спостережень нижня межа Вілсона досягає порогового значення засвоєння. На рис. 6 показано, що різниця між \hat{p} і p^- є максимальною за умови малих n і зменшується в міру накопичення даних.

Таблиця 2 – Динаміка засвоєння КЗ: наївна точність \hat{p} проти нижньої межі Вілсона p^-

n	c	\hat{p}	p^-	Status
2	1	0.50	0.16	Не засвоєно
4	2	0.50	0.21	Не засвоєно
6	4	0.67	0.35	Не засвоєно
12	8	0.67	0.43	Не засвоєно
20	15	0.75	0.56	Не засвоєно
24	20	0.83	0.70	Засвоєно

Швидкість навчання (Learning Velocity). Для оцінювання динаміки засвоєння використовується нахил p^- у часі: $LV = \Delta p^- / \Delta t$.

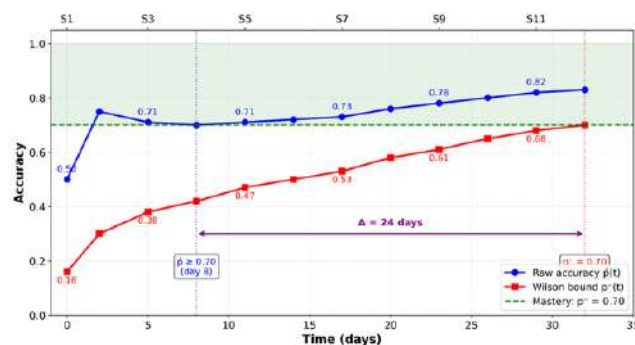


Рис. 6. Порівняння наївної точності та нижньої межі Вілсона

Інтегральний показник упевненості (Integral Confidence Score). Для цілісного оцінювання стану засвоєння кожного КЗ використовується:

Показник швидкості навчання LV дає змогу класифікувати темп засвоєння студента й адаптувати навчальне навантаження: студенти з нижчим LV потребують більше повторень і повільнішого введення нового матеріалу.

$$CS = 100 \cdot (w_1 \cdot p^- + w_2 \cdot S_{norm} + w_3 \cdot Coverage + w_4 \cdot R_{current}),$$

де $S_{norm} = \min(S / S_{max}, 1)$ – нормалізована стабільність; $Coverage$ – частка вивчених КЗ у темі; $R_{current}$ – поточне утримання в пам'яті. Статистично обґрунтований p^- має найбільшу вагу, оскільки забезпечує консервативну оцінку засвоєння. Багатокомпонентна структура теоретично перевершує будь-який одновиірний показник за прогностичною здатністю.

4.6 Композитна метрика готовності.

Адаптація темпу навчання. Платформа регулює кількість нових КЗ за сесію відповідно до індивідуальної швидкості навчання LV : студенти з нижчим LV отримують більше повторень (нижче співвідношення нових тем до повторень), що допомагає уникнути когнітивного перевантаження, а студенти з вищим LV – інтенсивніше навантаження, що підтримує їхню залученість.

Показник готовності (Readiness Score). Інтеграція всіх показників – метрика готовності до підсумкового оцінювання:

$$RS = 100 \times (w_{cov} \times Coverage + w_{mas} \times Mastery + w_{stab} \times Stability + w_{prob} \times Probability),$$

де $Coverage$ – частка КЗ з $p^- \geq \tau_{mastery}$ серед усіх КЗ курсу; $Mastery$ – середнє значення p^- за всіма КЗ; $Stability$ – середня нормалізована стабільність пам'яті; $Probability$ – середня ймовірність утримання в пам'яті на день складання іспиту.

Ваги відображають пріоритети: покриття w_{cov} є найважливішим – студент повинен продемонструвати засвоєння всіх тем, а не глибокі знання лише кількох. Засвоєння w_{mas} відображає середню глибину засвоєння. Стабільність w_{stab} урахує, чи збережуться знання до дня іспиту. Ймовірність утримання w_{prob} відображає поточний стан пам'яті. Метрика забезпечує інтегроване оцінювання, що поєднує чотири теоретично обґрунтовані виміри навчального прогресу.

4.7 Імплементация адаптивної системи навчання для мережі автошкіл. Для верифікації запропонованих формальних моделей було розроблено й впроваджено адаптивну платформу навчання FAHRAI в мережі автошкіл для підготовки до теоретичного іспиту з правил дорожнього руху. Система реалізує повний замкнений цикл адаптивного навчання і дає

змогу оцінити поведінку моделей у реальних умовах із різними категоріями студентів.

Інтерфейс навчальної сесії. На рис. 7 показано загальний вигляд інтерфейсу навчальної сесії. Розглянемо елементи інтерфейсу.

Індикатор активної стратегії вибору. На екрані відображається панель із ієрархічними стратегіями, де поточну активну стратегію візуально виділено. Це дає змогу студенту й інструктору зрозуміти логіку системи – чому саме це завдання було вибрано в цей момент.

Метадані завдання. Для кожного завдання відображено: категорію правил дорожнього руху (наприклад, «Проїзд перехресть»), рівень складності b , відповідність зоні найближчого розвитку (ZPD) й тип стратегії, за якою було вибрано завдання.

Інструменти навчальної підтримки. Система надає студенту кілька інструментів підтримки: «Підказка» – скорочена інформація, що спрямовує до правильної відповіді; «Пояснення» – детальний аналіз правила дорожнього руху, пов'язаного із завданням; «Правило ПДР» – посилання на відповідний пункт правил; «Приклад із реального життя» – унаочнення застосування правила в реальній дорожній ситуації; «Запитати AI» – можливість отримати детальне пояснення від інтегрованого AI-асистента. Використання інструментів підтримки враховується в показнику якості відповіді q : використання підказки зменшує вагу компонента впевненості, що коригує оновлення стабільності.

Візуалізація адаптивних метрик та їх вплив на навчальну траєкторію студента. На рис. 8 детально показано панель адаптивних метрик із поясненнями їх впливу на навчальну траєкторію. Кожна метрика має конкретне значення для студента.

Рівень здібностей ($\theta = 0.72$) визначає складність наступних завдань. Система вибирає завдання зі складністю $b \approx 0.79$, що потрапляє в зону найближчого розвитку й забезпечує оптимальний баланс між складністю та досяжністю.

The screenshot displays the FAHRAI learning interface. At the top, there are six progress indicators for different stages: 1. Prerequisites, 2. Retention (highlighted), 3. Remediation, 4. Exploration, 5. ZPD, and 6. Feedback. Below this, a question is shown: 'What does a flashing green traffic light signal mean?' with a difficulty of 0.85 and a ZPD status of 'in range'. The question has three multiple-choice options, with the first one selected. To the right, there are three performance metrics: 78% Pass Probability, 71% Knowledge Stability, and 74% Confidence Score. Below these, there are more detailed statistics: Knowledge Stability at 71%, Pass Probability at 78%, Overall Statistics showing 158 Correct and 68 Incorrect answers out of 224 Total Questions with a 70% Accuracy, and Study Time showing 4.2h Total Time and 38s Avg. per Question. At the bottom, there are navigation buttons for 'Select', 'Eggs', 'Submit', and 'AI', along with a 'Submit Answer' button.

Рис. 7. Загальний вигляд інтерфейсу навчальної сесії FAHRAI

Утримання в пам'яті ($R(t) = 58\%$) сигналізує, що знання з теми починають спадати й потрапляють в оптимальне вікно повторення $[0.45, 0.65]$. Система автоматично перемикається на стратегію критичного утримання, перериваючи вивчення нового матеріалу.

Стабільність ($S = 12.4$ днів) показує, наскільки міцно закріплені знання. Після кожного успішного повторення S зростає, а інтервали між повтореннями подовжуються, що зменшує навантаження на студента.

Нижня межа Вілсона ($p^- = 0.65$) показує, що тему ще не засвоєно й, відповідно, не зараховано, якщо порогове значення засвоєння становить 0.70. Наївна точність 70.5 % створила б ілюзію засвоєння, але консервативна оцінка Вілсона запобігає передчасному переходу до складніших тем.

Готовність ($RS = 78\%$) – інтегрований бал, що поєднує покриття тем, глибину засвоєння, стабільність пам'яті й прогноз утримання на дату іспиту. До порогового значення готовності, що становить 85 %, залишається 7 % – це дає змогу студенту оцінити свій стан і спланувати підготовку.

Адаптивна модифікація навчальної траєкторії. На рис. 8 також показано, як система модифікує навчальну траєкторію залежно від стану метрик студента. Розглянемо ключові сценарії адаптації.

Перехід від ZPD до критичного утримання. Коли утримання в пам'яті раніше вивченої теми знижується до порогового значення 65 %, система перериває вивчення нового матеріалу й встановлює повторення. Це максимізує ефект тестування, оскільки пригадування в оптимальному вікні потребує зусиль, але все ще є можливим.

Активізація ремедіації. Якщо буде виявлено систематичні помилки з конкретної теми ($p^- < 0.60$ за достатнього $R(t)$), то система спрощує завдання, активує

інструменти підтримки й повертає студента до базових понять теми.

Блокування на незасвоєних передумовах. Якщо перехід до нової теми потребує засвоєння попередньої (наприклад, «Сигнали світлофора» перед «Регулювання перехресть»), то система блокує перехід до виконання подвійного критерію засвоєння.

Перехід у режим підтримки. Коли тема демонструє стабільне засвоєння ($p^- \geq 0.70$, $n \geq 10$), вона переходить у режим лише повторень за адаптивним розкладом, звільняючи час для нового матеріалу.

Адаптація для різних категорій студентів. Система індивідуально адаптує параметри для різних категорій студентів (таблиця 3). Під «Пояснення + AI» розуміється використання методів штучного інтелекту для генерації персоналізованих пояснень і підтримки навчання але детальний опис відповідного модуля виходить за межі цієї роботи.

Переваги адаптивного навчання для мережі автошкіл: скорочення часу підготовки завдяки усуненню неефективних повторень уже засвоєного матеріалу; підвищення відсотка складання іспиту з першої спроби завдяки надійному оцінюванню готовності; можливість індивідуального темпу для кожного студента без збільшення навантаження на інструкторів; прозорість рішень системи, що дає змогу інструкторам контролювати навчальний процес.

5. Обговорення результатів. Представлені формальні моделі утворюють цілісну систему, у якій кожний компонент підсилює дію інших. IRT забезпечує точне добирання завдань відповідно до рівня студента, модель забування запобігає втраті засвоєних знань, довірчий інтервал Вілсона допомагає уникнути передчасних переходів, а персоналізація підтримує оптимальний темп і залученість. Ця синергія узгоджується з теорією бажаних труднощів [13] і теорією когнітивного навантаження [19].

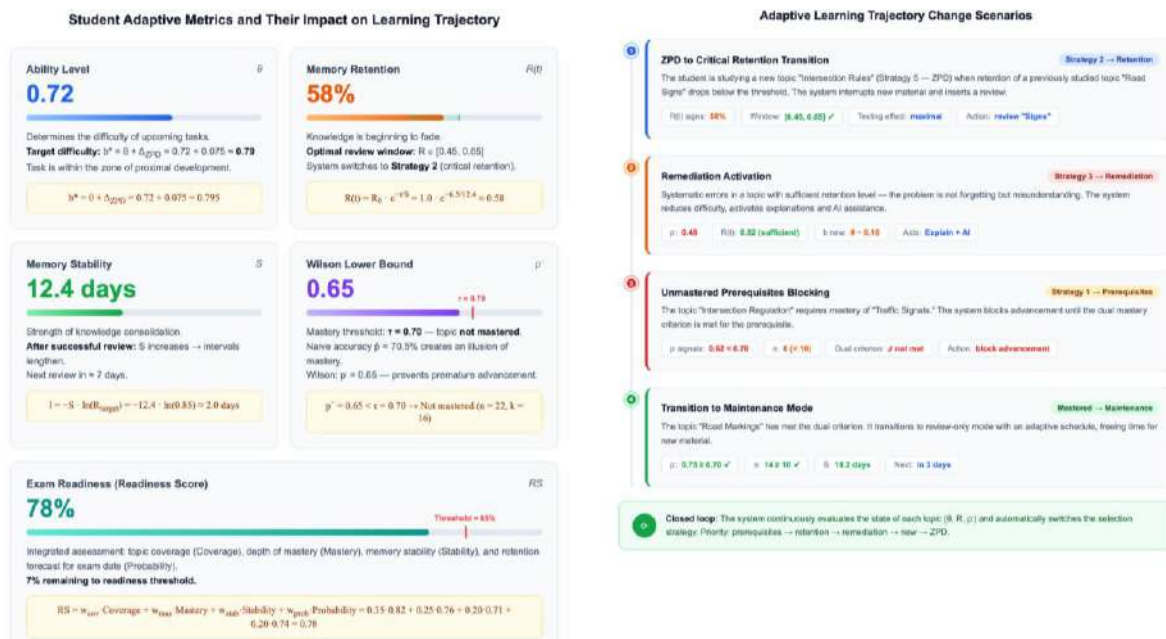


Рис. 8. Панель прогнозу з адаптивними метриками FAHRAI

Таблиця 3 – Адаптація параметрів до категорій студентів

Параметр	Швидкий учень	Повільний учень	Труднощі з темою	Готовий до іспиту
Активна стратегія	ZPD (5)	ZPD (5)	Remediation (3)	Retention (2)
Складність	$\theta + 0.075$	$\theta + 0.075$	$\theta - 0.10$	$\theta + 0.05$
Нове / Повторення	60 % / 40 %	30 % / 70 %	10 % / 90 %	5 % / 95 %
Цільове R^*	0.90	0.80	0.85	0.90
Інструменти підтримки	Вимкнено	Підказки	Пояснення + AI	Вимкнено

Інтегрована модель IRT із забуванням (IRT-forgetting) уперше об'єднує рівень здібностей і динаміку пам'яті в межах єдиного формального предиктора. Найвні підходи або моделюють здібності без урахування забування (класична IRT), або забування без урахування здібностей (SM-2, FSRS). Мультиплікативна структура $P = R \cdot P_{IRT} + (1 - R) \cdot P_{guess}$ має прозору когнітивну інтерпретацію: забування діє як «фільтр», через який проходять здібності. Теоретичний аналіз свідчить про покращену калібрацію моделі, особливо в діапазоні низьких імовірностей, де статична IRT систематично завищує шанси правильної відповіді.

Модель динамічної стабільності розвиває ідеї FSRS [21], додаючи два нові елементи: інтеграцію з IRT (початкова стабільність залежить від θ) і контекстно-залежний множник (ефективність повторення залежить від рівня утримання знань). Композитний показник якості q , який поєднує правильність, час і впевненість, забезпечує якісніше інформаційне поле для оновлення стабільності, ніж дискретна шкала SM-2.

Ієрархічний метод вибору завдань формалізує педагогічний принцип пріоритету фундаменту. Контекстно-залежні ваги забезпечують фокусування на найбільш релевантному факторі в межах кожної стратегії. Ієрархічна структура теоретично перевершує лінійну комбінацію стратегій завдяки можливості повного перемикавання між режимами навчання залежно від поточного стану студента.

Довірчий інтервал Вілсона вперше систематично обґрунтовано для контексту адаптивного навчання.

Консерватизм оцінки p^- за малих n допомагає уникнути передчасних рішень, що має значні теоретичні та практичні наслідки для зменшення хибнопозитивних оцінок засвоєння.

Моделі мають обмеження, які окреслюють напрями подальших досліджень. Параметри (Δ_{ZPD} , ваги стратегій, порогові значення) потребують калібрування для конкретних предметних областей і вікових груп. Ефективність для дисциплін із менш формалізованою структурою знань залишається питанням для подальшого дослідження. Застосування цієї моделі в інших предметних областях може потребувати recalібрації.

Висновки. У роботі запропоновано комплекс формальних моделей і методів адаптивного навчання, розроблених у межах платформи FAHRAI:

Інтегрована модель IRT-forgetting. Мультиплікативна комбінація ймовірності IRT 2PL із функцією

утримання пам'яті створює єдиний предиктор із теоретично покращеною калібрацією та дискримінативною здатністю порівняно з класичною моделлю IRT та адитивними комбінаціями.

Модель динамічної стабільності пам'яті. Композитний показник якості відповіді й контекстно-залежний множник забезпечують структурні переваги над SM-2 (неперервна модель, інтеграція з IRT) і FSRS (контекстно-залежне оновлення).

Ієрархічний метод вибору завдань. Багаторівнева ієрархія стратегій із контекстно-залежними вагами забезпечує педагогічно обґрунтований баланс між повторенням, корекцією, дослідженням і розвитком, теоретично перевершуючи лінійні комбінації стратегій.

Статистично надійне оцінювання. Довірчий інтервал Вілсона суттєво зменшує частку хибнопозитивних оцінок засвоєння порівняно з наивною точністю. Інтегральний показник CS поєднує чотири виміри навчального прогресу.

Композитна метрика готовності інтегрує покриття, засвоєння, стабільність пам'яті та ймовірність утримання в єдину прогностичну метрику.

Цілісна інтеграція запропонованих моделей у межах платформи FAHRAI формує комплексну формальну основу для адаптивного управління навчальним процесом. Це уможливило одночасне врахування рівня знань студента, динаміки забування, педагогічних пріоритетів і статистичної надійності оцінювання, забезпечуючи більш обґрунтоване ухвалення рішень щодо вибору навчальних завдань, планування повторень і визначення готовності до підсумкового оцінювання. Порівняно з фрагментованими підходами запропонований комплекс моделей створює передумови для підвищення ефективності персоналізованого навчання та впровадження адаптивних систем нового покоління.

Перспективи подальших досліджень охоплюють мультидисциплінарну валідацію, інтеграцію графів знань із моделюванням ефектів перенесення між темами, лонгітюдні дослідження ефективності моделей та адаптацію параметрів для різних вікових груп. Окремим напрямом є інтеграція методів штучного інтелекту для персоналізації навчання, а також проведення та аналіз рандомізованого контрольованого експерименту з метою емпіричної перевірки запропонованого підходу. Ці аспекти реалізовані у платформі FAHRAI, проте виходять за межі даної роботи і плануються до висвітлення в окремих публікаціях.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори не використовували жодних інструментів генеративного штучного інтелекту.

References

1. OECD. *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. Paris, OECD Publishing, 2023. 488 p. ISBN 978-92-64-35128-8.
2. Van Lehn K. The relative effectiveness of human tutoring, intelligent tutoring systems, and other tutoring systems. *Educational Psychologist*. 2011, vol. 46, no. 4, pp. 197–221. DOI: <https://doi.org/10.1080/00461520.2011.611369>.

3. Vygotsky L. S. *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1978. 159 p. ISBN 0-674-57628-4.
4. Ebbinghaus H. *Über das Gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig, Duncker & Humblot, 1885. ix, 169 p. (Library of Congress LCCN: e11000616.)
5. Murre J. M. J., Dros J. Replication and analysis of Ebbinghaus's forgetting curve. *PLoS ONE*. 2015, vol. 10, no. 7, article e0120644, 23 p. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120644>.
6. Cepeda N. J., Pashler H., Vul E., Wixted J. T., Rohrer D. Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis. *Psychological Bulletin*. 2006, vol. 132, no. 3, pp. 354–380. DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.354>.
7. Wilson E. B. Probable inference, the law of succession, and statistical inference. *Journal of the American Statistical Association*. 1927, vol. 22, no. 158, pp. 209–212. DOI: <https://doi.org/10.1080/000312459.1927.10502953>.
8. Agresti A., Coull B. A. Approximate is better than “exact” for interval estimation of binomial proportions. *The American Statistician*. 1998, vol. 52, no. 2, pp. 119–126. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.1998.10480550>.
9. Wozniak P. A. *Optimization of Learning: A New Approach and Computer Application*. Master's Thesis. Poznań, University of Technology in Poznań, 1990.
10. Chaiklin S. The zone of proximal development in Vygotsky's analysis of learning and instruction. In: Kozulin A., Gindis B., Ageyev V. S., Miller S. M., eds. *Vygotsky's educational theory in cultural context*. Cambridge, Cambridge University Press, 2003, pp. 39–64. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840975.004>.
11. Lord F. M. *Applications of item response theory to practical testing problems*. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, 1980. 274 p. ISBN 0-89859-006-X. (ERIC ED312280).
12. Baker F. B., Kim S.-H., ed. *Item response theory: Parameter estimation techniques*. 2nd ed. New York, Marcel Dekker, 2004. 480 p. ISBN 0-8247-5825-0.
13. Bjork E. L., Bjork R. A. Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning. In: Gernsbacher M. A., Pew R. W., Hough L. M., Pomerantz J. R., eds. *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society*. New York, Worth Publishers, 2011, pp. 56–64.
14. Roediger H. L., Karpicke J. D. Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*. 2006, vol. 17, no. 3, pp. 249–255. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01693.x>.
15. Brown L. D., Cai T. T., DasGupta A. Interval estimation for a binomial proportion. *Statistical Science*. 2001, vol. 16, no. 2, pp. 101–133. DOI: <https://doi.org/10.1214/ss/1009213286>.
16. Bransford J. D., Brown A. L., Cocking R. R., eds. *How people learn: Brain, mind, experience, and school*. Washington, DC, National Academy Press, 2000. Expanded edition. Washington, DC, National Academy Press, 2000. 384 p. ISBN 0-309-07036-8. DOI: <https://doi.org/10.17226/9853>.
17. Dunlosky J., Rawson K. A. Overconfidence produces underachievement: Inaccurate self evaluations undermine students' learning and retention of material. *Learning and Instruction*. 2012, vol. 22, no. 4, pp. 271–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.08.003>.
18. Hailikari T., Katajavuori N., Lindblom-Ylänne S. The relevance of prior knowledge in learning and instructional design. *American Journal of Pharmaceutical Education*. 2008, vol. 72, no. 5, article 113. DOI: <https://doi.org/10.5688/aj7205113>.
19. Sweller J., Ayres P., Kalyuga S. *Cognitive load theory*. New York, Springer, 2011. xvi, 274 p. ISBN 978-1-4419-8125-7. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>.
20. Zhao J. LECTOR: LLM-Enhanced Concept-based Test-Oriented Repetition for Adaptive Spaced Learning. *arXiv preprint arXiv:2508.03275*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.03275>.
21. Ye J., Su J., Cao Y. Optimizing spaced repetition schedule by capturing the dynamics of memory. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2023, vol. 35, no. 10, pp. 10085–10097. DOI: <https://doi.org/10.1109/TKDE.2023.3251721>.
22. Vie J.-J., Kashima H. Deep knowledge tracing is an implicit dynamic multidimensional item response theory model. *Proceedings of the 31st International Conference on Computers in Education (ICCE 2023)*. Matsue, Japan, December 4–8, 2023. Asia-Pacific Society for Computers in Education, 2023, pp. 118–127. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.12334>.

Надійшла (received) 01.04.2026
 Прийнята (accepted) 20.04.2026
 Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.89

O. O. KHOLODNIAK, postgraduate student, Department of Computer Sciences and Information Technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: o.o.kholodniak@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1012-7361>

O. V. PROKHOROV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Sciences and Information Technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: o.prokhorov@khai.edu; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4680-4082>

MODELS AND METHODS FOR INTELLIGENT MANAGEMENT OF PERSONALIZED LEARNING TRAJECTORIES BASED ON AN INTEGRATED IRT-FORGETTING FRAMEWORK

Despite the widespread adoption of modern learning management systems, most of them primarily focus on providing access to content and assessing outcomes, while overlooking the formalized modeling of individual learning trajectories and the dynamics of knowledge forgetting. This paper presents a comprehensive set of models and methods for adaptive learning, developed within the FAHRAI platform (Framework for Adaptive Hierarchical Review and Instruction). The following key components are proposed: (1) an integrated model that multiplicatively combines the two-parameter Item Response Theory model (IRT 2PL) with a memory retention function, enabling improved calibration compared to classical IRT; (2) a dynamic memory stability model incorporating a composite response quality indicator and a context-dependent multiplier; (3) a hierarchical task selection method based on a multi-level system of strategies and context-dependent weights of a composite prioritization score; (4) an approach based on the Wilson confidence interval for statistically reliable estimation of mastery level, significantly reducing the rate of false-positive decisions compared to naive accuracy; (5) a composite readiness metric integrating IRT parameters, memory retention, and the statistical reliability of the estimation. For each model, a formal description, theoretical justification, and numerical examples are provided. The proposed set of models and methods constitutes a unified theoretical framework for the development of adaptive learning systems, enabling improved accuracy in predicting learning outcomes, greater efficiency in repetition scheduling, and enhanced reliability in assessing individual learner progress.

Keywords: personalized learning trajectories, adaptive learning, item response theory, spaced repetition, zone of proximal development, Wilson confidence interval, learning personalization.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Холодняк Олександр Олександрович / Kholodniak Oleksandr Oleksandrovych

Автор 2 / Author 2: Прохоров Олександр Валерійович / Prokhorov Oleksandr Valeriyovych

R. O. GAMZAYEV, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor at the Department of Intelligent Software Systems and Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 6, Kharkiv-22, Ukraine, 61022; e-mail: rustam.gamzayev@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>

M. V. TKACHUK, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Intelligent Software Systems and Technologies, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 6, Kharkiv-22, Ukraine, 61022; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>

G. S. LEGENKYI, Student, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 6, Kharkiv-22, Ukraine, 61022; e-mail: lehenkyi2021ki11@student.karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4444-5759>

DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE FOR INTELLIGENT TESTING OF MICROSERVICE SOFTWARE SYSTEMS BASED ON MOCK-OBJECT TECHNOLOGY

Testing service-oriented and microservice-based systems is challenging due to strong dependencies on external services and distributed environments. Mock-based testing is widely used to address this issue; however, existing solutions rely on low-level configuration mechanisms that increase complexity and reduce maintainability. This paper proposes a domain-specific language (DSL) for intelligent specification and generation of mock services. The approach enables high-level, domain-oriented description of mock behavior and supports transformation into executable configurations for existing mocking platforms. The proposed solution aims to improve readability, reduce configuration effort, and enhance testing efficiency in distributed software systems. The paper reviews existing tools for mock-based testing of service-oriented applications and provides a comparative analysis based on ease of use, configuration flexibility, and the complexity of supported test scenarios. The analysis shows that existing solutions consistently trade off between expressiveness and accessibility, a limitation that the proposed DSL aims to address. To evaluate the proposed approach, a comparative experiment was conducted across four test scenarios of varying complexity. DSL-based configurations were compared against equivalent configurations defined without the DSL, using three metrics: specification size (SLOC), maximum nested block depth, and maintainability index. The results show that the DSL reduces cyclomatic complexity. The composite quality score of DSL-based configurations exceeds the baseline by 38 % on average. These findings confirm that the proposed DSL simplifies the creation of mock services and makes distributed system testing more accessible to a wider range of project participants.

Keywords: domain-specific language, intelligent approach, software, service-oriented architecture, microservice, testing, mock-object, distributed system, metric, quality.

Introduction. Service-oriented architecture (SOA) and microservice-based systems have become widely adopted due to their scalability, flexibility, and support for modular development. However, these architectural styles also increase testing complexity, since individual services often depend on external APIs, third-party platforms, and independently evolving infrastructure. Such dependencies may be unavailable during development, unstable in test environments, or costly to invoke repeatedly, which reduces the controllability and reproducibility of testing.

To address this issue, software teams widely employ mock services [1] that simulate the behavior of external systems and enable isolated, repeatable, and controlled validation of service interactions. Mocking approaches have been widely known since the early development of unit testing practices in the 1990s, particularly within the xUnit family of frameworks introduced by Kent Beck [2]. In this context, mock objects were initially used to isolate units of code by replacing their dependencies with controllable test doubles. In modern distributed environments, this idea has evolved from unit-level isolation to service-level simulation. Mocking is especially valuable in distributed environments because it supports parallel development, facilitates the simulation of both normal and exceptional scenarios, and reduces the impact of unavailable dependencies on the testing process.

Despite the availability of mature mocking platforms, the practical configuration of mock behavior remains difficult. In many cases, mock scenarios are specified through low-level mappings, programmatic APIs, or tool-

specific configuration formats, which increases the entry barrier and limits the accessibility of such solutions for non-programmer stakeholders. As a result, there is a need for higher-level mechanisms that preserve the expressive power of existing platforms while simplifying the specification of service behavior.

A promising direction is the use of domain-specific languages (DSLs), which enable users to describe solutions within a particular application domain at a higher level of abstraction than general-purpose programming languages [2,3]. In software engineering, DSLs are valued for their expressiveness, readability, and reduced technical overhead. These properties make them a suitable candidate for describing mock-service behavior in a concise and domain-oriented form.

This paper proposes a domain-specific language for an intelligent testing of service-oriented software systems based on mock-object technology. The proposed approach allows users to define mock scenarios through high-level constructs, edit them in a dedicated web interface, parse them on the server side, and transform them into executable configurations for a mock server. Such an approach is expected to improve readability, reduce configuration effort, and support automation in modern CI/CD workflows.

Brief overview of related work. Research on testing of service-oriented and distributed systems includes a variety of approaches aimed at improving test isolation, automation, and maintainability. One of the most widely adopted techniques is the use of mock objects, which



simulate the behavior of external dependencies and enable controlled validation of system interactions. An empirical study of open-source projects demonstrates that mocking is extensively used in practice, primarily to isolate components, emulate external services, and verify interactions between system elements [4]. At the same time, the study highlights that the configuration of mock behavior is often manual and tool-specific, which increases complexity and reduces accessibility.

In service-oriented settings, mock-based testing is supported by specialized platforms such as WireMock, MockServer, Hoverfly, Beeceptor, and Mocky. These tools enable request matching, response generation, proxying, and interaction verification [5]. However, they differ significantly in usability and capability, as illustrated in Table 1. Tools with high configuration flexibility (WireMock, MockServer) expose complex, low-level interfaces – JSON mappings, programmatic APIs, CLI-driven setup – that require substantial developer expertise. Conversely, simpler tools (Mocky, Beeceptor) offer accessible web-based interfaces but support only basic scenarios and lack the expressive power needed for complex service interactions. This trade-off between usability and expressiveness remains a consistent limitation across existing solutions.

In addition to traditional mocking approaches, several studies explore automated and specification-based techniques for testing service-oriented systems. In particular, specification-driven approaches enable automatic generation of test cases for REST APIs based on formal service descriptions, improving coverage and reducing manual effort [6]. These approaches demonstrate the benefits of higher-level abstractions in testing but are primarily focused on test generation rather than behavior simulation.

Another important research direction is the use of domain-specific abstractions and formal models for defining expected system behavior. For example, advanced approaches to test oracle generation allow modeling uncertainty and multi-level validation in complex systems such as cyber-physical environments [7]. These techniques improve the reliability of test validation but often introduce additional complexity in the specification.

In parallel, artificial intelligence techniques are increasingly applied to software testing. AI-based methods enable automation of test analysis, pattern recognition, and optimization of test suites [8]. However, these approaches are typically focused on test generation and analysis rather than on modeling external service behavior through mocks.

More recently, industrial solutions have started to explore AI-driven mocking and service virtualization. These approaches automatically generate mock services from recorded traffic and dynamically adapt system behavior for testing purposes [9]. While they significantly reduce manual configuration effort and increase realism, they often rely on complex infrastructure and provide limited transparency and control over mock behavior specification.

Overall, existing research highlights the importance of abstraction, automation, and simulation in testing distributed systems. However, there remains a gap between expressive power and usability, particularly in defining mock behavior in a simple and domain-oriented way. This motivates the need for higher-level approaches, such as the domain-specific language proposed in this work.

Problem statement. The analysis of existing tools and research presented above reveals several challenges in mock-based testing of service-oriented systems. Although prior studies emphasize the importance of abstraction, automation, and simulation, current solutions still show a clear gap between usability and expressive power.

In particular, tools that provide sufficient flexibility for modeling complex interaction scenarios (such as WireMock or MockServer) rely on low-level and technically complex configuration mechanisms. At the same time, tools that are accessible to a wider audience (such as Mocky or Beeceptor) support only simple scenarios and lack the expressive power required to model realistic service interactions.

This trade-off is not limited to issues of user interface or ease of use. It reflects the absence of an appropriate level of abstraction between the tester's intent and the configuration mechanisms underlying existing solutions – a gap that remains insufficiently addressed in both research and industrial practice.

To better illustrate this limitation, consider the typical interaction model described earlier (see fig. 1). In production environments, a service-oriented system communicates directly with external services. In testing environments, these dependencies are replaced by a mock server whose behavior is controlled through a configuration mechanism. However, regardless of the complexity of the test scenario, such configuration is currently defined using low-level technical artifacts, such as configuration files, code written in a general-purpose programming language that interacts with the mock server API, or CLI commands. As a result, the specification of test scenarios becomes tightly coupled with implementation details, which reduces clarity and increases effort.

Table 1 – Overview of existing approaches

Criterion	Mocky	WireMock	MockServer	Beeceptor	Hoverfly
Ease of use	High	Medium	Medium	High	Low
User interface	Web UI	CLI, Java, Web UI	CLI, Java, UI	Web UI	CLI, Web UI
Configuration flexibility	Low	High	High	Low	Medium
Complexity of testing scenarios	Simple	Complex	Complex	Medium	Medium

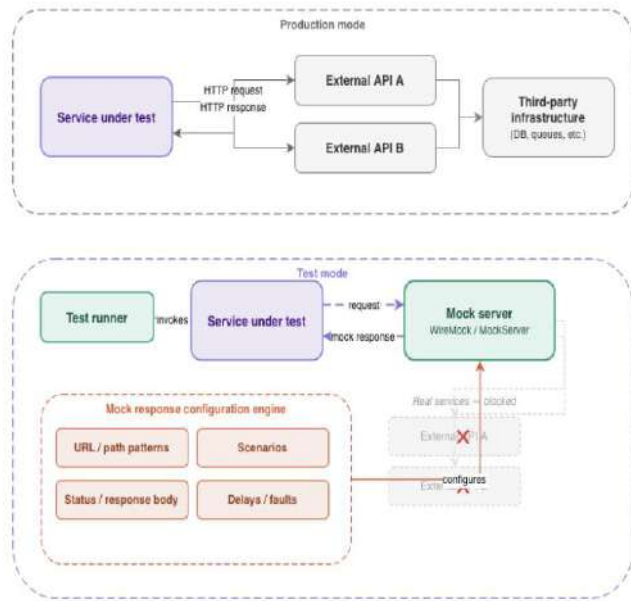


Fig. 1. Mock server-based testing architecture

This situation leads to several specific problems:

1. Low-level specification of mock behavior. Mock scenarios are described in implementation-oriented terms rather than domain concepts. Testers are forced to work with request matching rules and response structures instead of directly expressing test intent.
2. High configuration and maintenance effort. As the number of mock services and endpoints grows, the amount of configuration artifacts increases significantly. The lack of concise and reusable constructs leads to duplication, reduced readability, and higher maintenance effort.
3. Limited participation of stakeholders. The need for programming skills or deep knowledge of specific tools limits the involvement of QA engineers, test analysts, and domain experts. This creates bottlenecks and increases dependency on developers.
4. Limited support for automation and integration. Existing configuration approaches are not well suited for structured, version-controlled, and CI/CD-integrated workflows, which makes it difficult to incorporate mock-based testing into modern DevOps practices.

To address these problems, this work proposes the design and implementation of a domain-specific language (DSL) for specifying mock service behavior. The proposed approach introduces a higher level of abstraction for describing service behavior, enables intent-oriented scenario definition, reduces configuration complexity through concise and expressive syntax, lowers the entry barrier for non-developer stakeholders, and supports automatic transformation of DSL specifications into executable configurations (e.g., for WireMock).

Main materials and methods. We defined the lexical rules that break the text stream into individual tokens. These rules serve as the foundation for subsequent syntactic analysis and the construction of the logical structure of the code. Thanks to them, each element a string, a number, or a comment will have an unambiguous definition, which is key to the stability and accuracy of the system's operation. The core lexical components of the DSL include tokens for

strings, numbers, boolean values, and others that form the basic elements of the syntax. Base lexical components of our DSL presented at Table 2.

Table 2 – Lexical components our DSL

Token	Value	Description
STRING	''' (\\ [\"\\] ~[\"]) * '''	A quoted string with escape sequence support
TRIPLE_STRING	'''''' (\\ '''''' .) * ? ''''''	A triple-quoted string that can contain any content
NUMBER	'-?' [0-9]+ ('.' [0-9]+)?	Integer or decimal number
BOOLEAN	'true' 'false' 'TRUE' 'FALSE'	Boolean values
LINE_COMMENT	'//' ~[\\r\\n]* -> skip	Inline comment
BLOCK_COMMENT	'/*' .*? '*/' -> skip	Block comment
WS	[\\t\\r\\n]+ -> skip	Whitespace, tabs, and newlines
Token	Value	Description

Development of this specialized language, each test endpoint is described as a single block beginning with the “DEFINE ENDPOINT” keyword construct, followed by a block enclosed in curly braces that contains the endpoint description.

Formally, an endpoint definition can be represented as a tuple:

$$E = \langle R, P, D \rangle, \tag{1}$$

where R is the request definition (method, path, matching conditions);

P is the response definition (direct, fault, or proxy response type, along with optional delays and webhooks);

D is an optional textual description.

Each component given in (1) is specified through a dedicated DSL block: DEFINE REQUEST, DEFINE RESPONSE, and SET DESCRIPTION TO, respectively. The request is described inside a block beginning with DEFINE REQUEST. It contains a number of mandatory commands, such as setHttpMethodCommand, setUrlMatchTypeCommand and setPathCommand. Additional settings can also be specified, namely: priority definition, query parameters, headers, cookies, form parameters, and various rules for the incoming request body.

The response is defined inside the DEFINE RESPONSE block. Within this block, one of three response types can be specified: a direct response, a fault response, or a proxy response. For a direct response, the ADD DIRECT RESPONSE block is used, containing commands for setting the status code, the response body type, and the corresponding content. To simulate an error condition, ADD FAULT RESPONSE is used, along with the fault

type set via `setFaultTypeCommand`. In the case of a proxy response, the definition is formed through `ADD PROXY RESPONSE`, which contains a command for specifying the remote service URL, along with additional parameters for host rewriting and template usage.

Optionally, a description can be defined via the `setEndpointDescriptionCommand`. Individual blocks in the grammar extend the capabilities for describing service response behavior. If necessary, negation is possible through the keyword "NOT".

The grammar provides a strictly formalized description of conditions for request validation. Commands for them are written using special constructs. There are simple and composite conditions. All of them follow the same format, where the condition type and its value are specified. They allow the description to be broken down into structural blocks, each responsible for a specific part of the test endpoint definition.

The simplest validation method only checks for the presence of a request body. It does not pay attention to its content. This is convenient when you need to ensure that the request is not empty, and specific data is not expected.

The next validation method focuses on the structure of the request body, such as XML. It compares the content with an expected document of this format. The comparison is performed character by character, and XMLUnit can be activated. This allows you to ignore minor differences, for example, in formatting.

JSON structure validation compares the request body with an expected object of this format. It is possible to customize the validation to disregard the order in arrays. You can also ignore extra elements that are not present in the expected value.

Endpoint definition is a key element described using the `DEFINE ENDPOINT` construct. It brings together both the request and the response, serving as the wrapper that formalizes how a client is expected to interact with the system under development. In addition to its core components, an endpoint definition can be supplemented with an optional description using the `SET DESCRIPTION TO` command, which allows an explanatory note to be added that clarifies the purpose or specific characteristics of the endpoint.

The constituent parts of a request definition include the `QUERY_PARAMS`, `FORM_PARAMS`, `HEADERS`, and `COOKIES` constructs. All of them are optional, and each is responsible for a distinct type of input data. They contain dedicated blocks that describe conditions for specific fields, with each block consisting of one or more rules. Each rule specifies a field name and defines the criteria it must satisfy. This provides a highly flexible way of describing under which conditions a request should trigger an endpoint's response (see fig. 2).

This example declares an endpoint for handling user login via a POST request at the path `"/api/login"`. In response, the server returns a status code of 200 with a JSON body containing the message "Login successful". The `"DEFINE REQUEST"` construct allows specifying which HTTP request should trigger the endpoint response. First, the request method is defined – for example, GET,

POST, PUT, DELETE, PATCH, OPTIONS, TRACE, or ANY. Then the path is set according to the specified type.

```

DEFINE ENDPOINT {
  SET DESCRIPTION TO "Login API endpoint"
  DEFINE REQUEST {
    SET METHOD TO POST
    SET URL_MATCH_TYPE TO PATH
    SET REQUEST_PATH TO "/api/login"
    QUERY_PARAMS {
      ADD QUERY_PARAM_RULE {...}
    }
    HEADERS {...}
    COOKIES { ADD COOKIE_RULE {...} }
  }
  FORM_PARAMS {ADD FORM_PARAM_RULE {...} }
  DEFINE RESPONSE {
    ADD DIRECT RESPONSE {
      SET STATUS_CODE TO 200
      SET BODY_TYPE TO JSON
      SET VALUE TO "{\"message\":\"Login successful\"}" }
  }
}

```

Fig. 2. Definition of ENDPOINT

It can be simple, include parameters, or even use regular expressions. The path is defined using the following types: `PATH`, `PATH_AND_QUERY`, `ANY_URL`, `PATH_AND_QUERY_REGEX`, `PATH_TEMPLATE`, and `PATH_REGEX`.

Conditions can be simple or composite. A simple condition checks a single value. The most basic of them is `EQUALS`, which verifies whether the value matches exactly. Next is `CONTAINS`, which checks whether the value includes a substring. `MATCHES_REGEX` is applied for regular expressions, while types such as `MATCHES_JSON_PATH` or `MATCHES_XPATH` are used to validate against a specific path within a JSON or XML structure respectively. There are also conditions for validating more complex formats. For example, `MATCHES_JSON_SCHEMA` checks whether the incoming JSON conforms to a given schema. `EQUALS_JSON` or `EQUALS_XML` compare the corresponding request bodies for identity. For dates, `EQUALS_DATE_TIME`, `BEFORE`, or `AFTER` can be used to verify time boundaries or exact matches. Composite conditions combine multiple simple ones. Logical operations can be used depending on the type. There is also `VALUES_INCLUDE`, which checks whether values from a set of conditions are included in the input data, and `VALUES_EXACTLY`, which requires an exact match of the set of values.

Furthermore, any simple or composite condition can be negated to indicate that it must not be satisfied (see fig.3).

Response to a request is defined through the `responseDefinition` block, which can be direct, fault-based, or a proxy. It is possible to add delays and webhooks to create realistic testing scenarios.

A direct response is defined within the `"ADD DIRECT RESPONSE"` block and allows specifying a custom response. It can include a status code, body type, and content.

Headers can also be added optionally. Dynamic templating can be enabled for greater flexibility. The status

code is set using the straightforward command "SET STATUS_CODE TO".

```

QUERY_PARAMS {
  ADD QUERY_PARAM_RULE {
    SET NAME TO "filter"
    ADD CONDITION {
      SET REQUEST_CONDITION_TYPE TO OR
      ADD CONDITION {
        SET REQUEST_CONDITION_TYPE TO EQUALS
        SET VALUE TO "active"
      }
      ADD CONDITION {
        NOT {
          SET REQUEST_CONDITION_TYPE TO EQUALS
          SET VALUE TO "inactive"
        }
      }
    }
  }
}
    
```

Fig. 3. Usage of condition

Body type is defined via "SET BODY_TYPE TO", with supported formats including JSON, XML, HTML, TEXT, and BASE64. The response content is specified using the "SET VALUE TO" command. Headers are added optionally through "HEADERS".

Templating can be activated via setDynamicResponseTemplatingCommand, which allows generating dynamic content in the response. An example of this construct is shown in the Fig. 4.

```

DEFINE RESPONSE {
  ADD DIRECT RESPONSE {
    SET STATUS_CODE TO 200
    SET DYNAMIC_RESPONSE_TEMPLATING TO TRUE
    HEADERS {
      ADD HEADER {
        SET NAME TO "headerName"
        SET VALUE TO "headerValue"
      }
      ADD HEADER {
        SET NAME TO "headerName"
        SET VALUE TO "headerValue"
      }
    }
  }
  SET BODY_TYPE TO TEXT
  SET VALUE TO "response body query"
}
    
```

Fig. 4. Dynamic Response

A fault response is defined through "ADD FAULT RESPONSE" and is used to simulate various types of errors. It allows modeling situations where a connection is closed without a response, or when malformed data is sent. The fault type is set via setFaultTypeCommand. The list of possible values is provided in Table 3.

A proxy response is defined in the "ADD PROXY RESPONSE" block and allows redirecting a request to another URL. In this type of response, the target address can be set using the setUrlCommand.

Delays for a response are defined in the "DELAY" block and allow simulating processing time or network latency. If no delay is needed, the type corresponding to the value NO_DELAY is used. For a fixed delay, FIXED is

used. To simulate a random delay, RANDOM_UNIFORM can be applied. All types support configuring time units via timeUnits, which can be milliseconds, seconds, minutes, or hours.

Table 3 – Fault response values

Fault Type	Description
NO_FAULT	No fault.
CLOSE_SOCKET_WITH_NO_RESPONSE	Closes the connection without a response.
SEND_BAD_HTTP_DATA_THEN_CLOSE_SOCKET	Sends malformed data and then closes the socket.
PEER_CONNECTION_RESET	Simulates a situation where the connection is reset at the network level.
SEND_200_RESPONSE_THEN_BAD_HTTP_DATA	First sends a valid response, then sends malformed data.

Webhooks are placed in the "WEB_HOOKS" block and allow additional HTTP requests to be sent automatically when an endpoint is called. Each one is defined via webHookDefinition. Within it, the request method is defined using setHttpMethodCommand, the URL is specified via setUrlCommand, and headers can also be added. The body type is defined through setResponseBodyTypeCommand. The actual content is set via setValueCommand. Additionally, a delay before sending the webhook can be configured using responseDelay. This structure provides great flexibility and allows not only generating standard, error, or proxy responses, but also extending functionality through integrations with other services.

Results and discussion. Developed for creating and managing mock services in SOA, this system uses a DSL to simplify the process. Its modular architecture allows for adding new features or adapting to changing requirements. It consists of four main components: a web interface, Java-based middleware, a MongoDB database, and WireMock. The component diagram of the system is presented in fig 5.

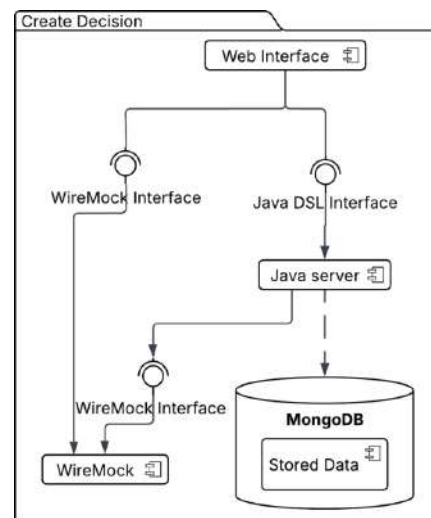


Fig. 5. Component diagram

The middleware is implemented in Java using the Spring Boot framework. It is responsible for processing the DSL code received from the web interface. For parsing, it uses ANTLR to analyze the syntax and create an AST. Based on this tree, the tool generates mock service configurations in a format compatible with WireMock. The service also interacts with MongoDB to store DSL scripts, processing statuses, and drafts.

MongoDB serves as the primary storage for DSL scripts, parsing results, and temporary saves. The system uses two main collections: `definition_attempts` and `quick_saves`. The first contains all code interpretation attempts, including success status and error logs, allowing for history tracking and diagnostics. The second stores the latest version of the code without creating a full configuration, which is useful for intermediate saves during editing. All storage logic is built using Spring Data MongoDB.

The web interface is the primary point of user interaction. Built with React, TypeScript, and Vite, it provides a fast and responsive user experience. It features the Monaco Editor for writing and editing DSL code, offering syntax highlighting, autocompletion, and real-time validation (see fig.6). The code entered by the user is sent to the backend via an HTTP/REST API for processing.

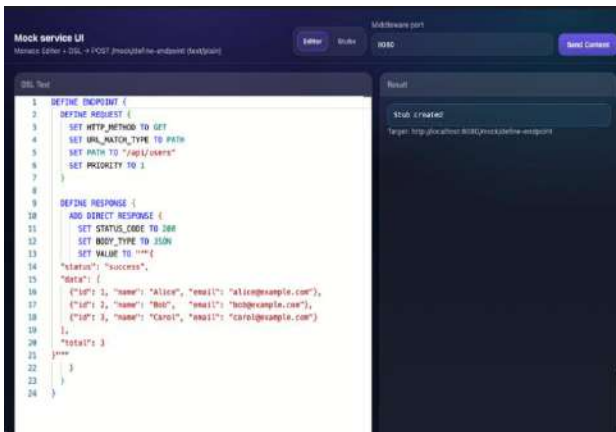


Fig. 6. Web interface view

WireMock is the core engine for setting up mock services. It is deployed in a Docker container to ensure an isolated environment and simplify deployment. WireMock functions as a standalone service that receives HTTP requests containing configurations from the Java middleware, based on which it creates simulated endpoints.

To evaluate the proposed approach, three metrics were selected. Configuration size is measured as the number of non-empty source lines (SLOC) [10], which reflects the effort required to author and maintain specifications. Structural complexity is captured by Maximum Nested Block Depth - the deepest level of block nesting along any path through the specification, which correlates with comprehension difficulty [11]. Finally, overall maintainability is assessed using the Maintainability Index (MI), a composite score on a 0–100 scale that combines Halstead Volume, Cyclomatic Complexity, and lines of code [12].

We focused on how well the solution supports realistic testing needs: how quickly and unambiguously an

endpoint can be described in the DSL, how accurately request-matching rules are applied, how flexible the response configuration is, and whether the resulting behavior remains predictable across multiple scenarios.

First, we created a simple baseline endpoint to confirm that the system can register a stub and return a fixed response without any additional request constraints. This case represents the “happy path” where a client sends a request and receives a predefined JSON payload. It allowed us to validate the basic flow end-to-end: parsing the DSL, creating the stub, and serving the response.

Next, we introduced a header-dependent scenario to test conditional behavior based on request metadata. In this experiment, the response depends on the presence and value of a specific HTTP header. This verifies that the proposed approach supports matching rules beyond the URL and method and can model real-world cases where different users or roles produce different outcomes. For example, we created an endpoint whose returned payload changes according to the value of an X-Role (or similar) request header.

After that, we tested more complex behavior where the response depends on the request body. We created POST endpoints that accept a JSON payload (e.g., containing fields such as amount, currency, and status) and return different responses depending on the provided values. This step demonstrates that the DSL can express request-body conditions and that the stubbed behavior can simulate multiple branches such as approved/declined/pending, which is typical for payment-like or workflow-like integrations.

In addition, we verified dynamic response templating. Specifically, we created an endpoint that reads the value of a request header and injects it into the JSON response using WireMock templating.

Finally, we executed a series of curl requests to validate the created stubs in practice, including POST requests with JSON bodies, form-like bodies, and different HTTP methods against the same path (e.g., GET /info vs POST /info). This confirmed that the mock service correctly differentiates requests by method, header constraints, and body conditions, and that it can provide predictable responses suitable for integration testing and local development with no request body and no matching rules.

To aggregate the three metrics into a single quality indicator, each metric was normalized to the [0, 1] range using min-max scaling. For SLOC and Depth (lower is better), the normalization was inverted. For MI (higher is better), standard normalization was applied. The composite score was computed as the unweighted mean of the three normalized values:

$$\text{Score} = \frac{\text{norm_inv}(\text{SLOC}) + \text{norm_inv}(\text{Depth}) + \text{norm}(\text{MI})}{3}. \quad (2)$$

On average, the DSL approach achieves a composite score of 0.58 compared to 0.42 for the baseline configuration approach, representing an improvement of approximately 38 %.

Conclusions and future work. Conclusions and future work. The paper presented the domain-specific

language for intelligent specification and generation of mock-objects in service-oriented and microservice architectures. The proposed DSL provides a higher level of abstraction over existing mocking platforms, enabling concise, intent-oriented description of mock behavior without requiring some deep knowledge of tool-specific configuration mechanisms. The elaborated software solution was implemented as a modular platform comprising a React-based web editor with the Monaco Editor, a Spring Boot middleware using ANTL [13] for DSL parsing and AST construction, a MongoDB persistence layer, and a WireMock execution engine deployed in Docker container. The effectiveness of the proposed approach was evaluated through a comparative experiment across the four test scenarios with increasing complexity. The DSL-based configurations were assessed against equivalent low-level configurations using three selected metrics: a specification size (SLOC), a maximum nested block depth, and a maintainability index. The composite quality score of DSL-based configurations, presented in formula (2), exceeded the baseline by 38 % on average, demonstrating measurable improvements in code quality and specification clarity, presented in Table 4. The proposed DSL consistently reduced the nesting depth and produced more maintainable specifications, particularly, in appropriate scenarios involving conditional logic, dynamic response templating, and multi-branch request matching. Taking these points into account, the several directions could be identified for future development of the proposed approach. First, a performance optimization for large-scale software projects with numerous mock services would reduce latency in DSL parsing and configuration generation, making the platform suitable for enterprise-grade test environments. Second, an extending protocol support beyond HTTP/HTTPS to include WebSocket and gRPC would broaden applicability to real-time systems and IoT architectures. Third, a security hardening with an encryption of stored DSL scripts in DBMS MongoDB for stronger authentication between the middleware, and with usage of WireMock tool for production deployments where especially a data confidentiality is critically important. Additionally, a hybrid text-and-visual editing model could be explored to support both technically experienced users and non-developer stakeholders such as QA analysts and domain experts. Although the usage of graphical interfaces causes some additional implementation complexity, they may significantly lower the entry barrier and increase adoption in heterogeneous project teams. Besides that, an empirical validation to be done previously in CI/CD pipelines and large-scale multi-

service projects, would also help to identify some performance bottlenecks, and to refine the already implemented DSL constructs based on suitable real-world usage patterns.

Summarized, the proposed solution represents a meaningful contribution to the field of SOA and microservice - based applications testing. By reducing of manual configuration effort, lowering the risk of specification errors, and improving team-wide accessibility of mock-based testing, it addresses a gap that remains insufficiently resolved in both research and industrial practice. The elaborated approach can also serve as a foundation for further research in some related areas, e.g., for an automated test generation from available DSL specifications, and for an AI-assisted mock scenarios building based on recorded system traffic.

Declaration on the use of generative AI. The authors used generative AI tools for English language checking and paraphrasing. All content was reviewed and approved by the authors.

References

1. MockServer. *Official Website*. Available at: <https://www.mock-server.com/> (accessed: 15.02.2026).
2. Beck K. *Kent Beck's Guide to Better Smalltalk*. Cambridge, Cambridge University Press, 1998. 408 p. ISBN 978-0-521-64437-2.
3. Fowler M. *Domain-Specific Languages*. Boston, Addison-Wesley Professional, 2010. 640 p. ISBN 978-0-321-71294-3.
4. Mernik M., Heerin J., Sloane A. *When and How to Develop Domain-Specific Languages*. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1118890.1118892> (accessed: 15.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1145/1118890.1118892>.
5. Ed-douibi H., Izquierdo J. L. C., Cabot J. Automatic Generation of Test Cases for REST APIs: A Specification-Based Approach. *IEEE 22nd International Enterprise Distributed Object Computing Conference (EDOC)*. 2018. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328991978_Automatic_Generation_of_Test_Cases_for_REST_APIs_A_Specification-Based_Approach (accessed: 15.02.2026). DOI: 10.1109/EDOC.2018.00031.
6. Valle P., Arrieta A., Han L., Ali S., Yue T. Defining and generating multi-level and uncertainty-wise test oracles for cyber-physical systems. *Softw Syst Model*. 2025, vol. 24, pp. 679–704. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10270-025-01271-8> (accessed: 15.02.2026). DOI: 10.1007/s10270-025-01271-8.
7. De Almeida R., Da Silva R. M., Serrano L. S., Campos Junior H. S., Neves V. O. Mock Objects in Software Testing: An Analysis of Usage in Open-Source Projects. *SBQS '23: Proceedings of the XXII Brazilian Symposium on Software Quality*. 2023, pp. 72–79 Available at: <https://doi.org/10.1145/3629479.3629510> (accessed: 15.02.2026).
8. Felderer, M., Enoiu, E. P., Tahvili, S. (2023). Artificial Intelligence Techniques in System Testing. *Romero J. R., Medina-Bulo I., Chicano F. (eds). Optimising the Software Development Process with Artificial Intelligence. Natural Computing Series*. Springer, Singapore. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-19-9948-2_8 (accessed: 15.02.2026).

Table 4 – Result's Tests

	SLOC		Max Nested Block Depth		Maintainability index	
	DSL	Configuration	DSL	Configuration	DSL	Configuration
Test case 1	23	24	3	2	64.55	59.22
Test case 2	74	55	3	3	52.49	51.82
Test case 3	69	71	3	3	52.82	49.03
Test case 4	85	101	3	3	50.41	45.67

9. *From External Chaos to Business Value: The Power of AI Mocking*. Available at: <https://speedscale.com/blog/from-external-chaos-to-business-value-the-power-of-ai-mocking/> (accessed: 15.02.2026).
10. Gomez N., Batham S., Volonte M., Tiffany D. Do. Virtual Interviewers, Real Results: Exploring AI-Driven Mock Technical Interviews on Student Readiness and Confidence. *CSCW Companion '25: Companion Publication of the 2025 Conference on Computer-Supported Cooperative Work and Social Computing*. 2025, pp. 209–213. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3715070.3749227> (accessed: 15.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1145/3715070.3749227>.
11. Bhatt K., Tarey V., Patel P. Analysis Of Source Lines Of Code (SLOC) Metric. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 150–154. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281840565_Analysis_Of_Source_Lines_Of_CodeSLOC_Metric (accessed: 15.02.2026).
12. Harrison W. A., Magel K. I. A complexity measure based on nesting level. *ACM SIGPLAN Notices*. 1981, vol. 16, iss. 3, pp. 63–74. Available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/947825.947829> (accessed: 15.02.2026). DOI: <https://doi.org/10.1145/947825.947829>
13. Oman P., Hagemester J. Metrics for assessing a software system's maintainability. *Proceedings of the International Conference on Software Maintenance (ICSM)*, 1992, pp. 337–344. Available at: https://www.researchgate.net/publication/2954310_Using_Metrics_to_Evaluate_Software_System_Maintainability (accessed: 15.02.2026). DOI: [10.1109/ICSM.1992.242525](https://doi.org/10.1109/ICSM.1992.242525).
14. *What is ANTLR (ANOther Tool for Language Recognition)?*, Terensi Parr. Available at: <https://www.antlr.org/> (accessed: 15.02.2026)

Received 06.03.2026
Accepted 30.03.2026
Published 20.05.2026

УДК 004.43; 004.051; 811.93

Р. О. ГАМЗАЄВ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, доцент кафедри інтелектуальних програмних систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022; e-mail: gustam.gamzayev@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>

М. В. ТКАЧУК, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтелектуальних програмних систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>

Г. С. ЛЕГЕНЬКИЙ, студент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, Україна, 61022; e-mail: lehenkyi2021ki11@student.karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4444-5759>

ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНА МОВА ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ МІКРОСЕРВІСНИХ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МОСК-ОБ'ЄКТІВ

Тестування сервісно-орієнтованих та мікросервісних систем є складним завданням через їх сильну залежність від зовнішніх сервісів та розподілених середовищ. Тестування на основі макетів об'єктів (mock-об'єктів) широко використовується для вирішення цієї проблеми; однак існуючі рішення використовують низькорівневі програмні механізми конфігурування таких систем, що збільшує складність процесів їх супроводу. У цій статті пропонується предметно-орієнтована мова (domain-specific language - DSL) для інтелектуальної підтримки процесів специфікації та генерації mock-об'єктів. Цей підхід дозволяє забезпечити можливість високорівневого опису поведінки таких об'єктів та підтримує автоматизацію побудови їх конфігурацій існуючих технологічних платформ. Запропоноване рішення спрямоване на покращення читабельності, зменшення зусиль на конфігурацію та підвищення ефективності тестування в розподілених програмних системах. У статті розглядаються існуючі інструменти для тестування сервісно-орієнтованих програм на основі mock-об'єктів та проводиться їх порівняльний аналіз, заснований на критеріях простоти використання, гнучкості конфігурації та складності підтримуваних тестових сценаріїв. Аналіз показує, що існуючі рішення мають певні недоліки та обмеження щодо їх реалізації, усунення яких уможливило застосування мови DSL. Для оцінки запропонованого підходу було проведено порівняльний експеримент за чотирма тестовими сценаріями різної складності. Конфігурації на основі DSL порівнювалися з еквівалентними конфігураціями, визначеними без використання DSL, за допомогою трьох кількісних метрик: розмір специфікації (SLOC), максимальна глибина вкладених блоків та індекс супроводжуваності. Сукупний показник якості тестових конфігурацій, побудованих на основі використання DSL, перевищує їх показники для базового сценарію у середньому на 38 %. Ці висновки підтверджують, що запропонована мова DSL спрощує створення макетних сервісів і робить тестування розподілених систем доступнішим для ширшого кола учасників проекту.

Ключові слова: предметно-орієнтована мова, інтелектуальний підхід, програмне забезпечення, сервісно-орієнтована архітектура, мікросервіс, тестування, mock-об'єкт, розподілена система, метрика, якість.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Гамзаєв Рустам Олександрович / Gamzayev Rustam Oleksandrovych

Автор 2 / Author 2: Ткачук Микола Вячеславович / Tkachuk Mykola Vyacheslavovych

Автор 3 / Author 3: Легенький Гліб Сергійович / Legenkyi Glib Sergiiovych

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	4
<i>Chernova N. L., Bezkorovainyi M. R.</i> An intelligent system for dish-level diet planning based on an optimization model	4
<i>Pavlov A. A., Kyselov M. Ye.</i> Verification of empirical models of simplex method complexity using the modified GMDH	13
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	18
<i>Ivashchenko O. V., Filip S., Yuriev N. R.</i> Fuzzy logic in dormitory accommodation recommendation systems: accounting for uncertainty and linguistic student preferences	18
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	24
<i>Smolenskyi M. M., Sidenko Ie. V.</i> Trusted rfid event modeling for audit, security, and provenance in patient appointment workflows	24

Сокол В. Є., Гурт Д. О., Годлевський М. Д., Пашиєв А. А. Моделювання впливу корпоративних знань та організаційного контексту ІТ компанії на локальні критерії якості процесу розробки програмного забезпечення.....	33
Петров К. Е., Чалий Т. В. Контрфактична модель медичного бізнес-процесу.....	40
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	45
Kovalenko S. V., Kovalenko S. M., Aleksandrova T. E., Malko M. M. Automated object segmentation and background removal in multimedia content processing systems.....	45
Кудряшова А. В., Оліярник Т. І., Сліпецький Ю. Б. Проектування інформаційної системи для опрацювання растрових зображень.....	52
Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. Responsibility-weighted aggregation of quality criteria in multi-layer iot software architectures.....	57
Чалий С. Ф., Кравченко Р. В. Інформаційна технологія побудови пояснень з використанням темпорально упорядкованих вхідних даних інтелектуальної системи.....	64
Kopp A. M., Gamayun I. P., Dashkivskiy R. B., Kostin Ye. R. Information technology for optimal service placement prediction in a multi-cloud environment using machine learning.....	69
Mostovyi O. S. Control flow graph recovery for dynamically loaded code via symbolic library resolution.....	74
Лециньська І. О. Метод верифікації збалансованості ментальних моделей рішення інтелектуальної системи.....	80
Grinchenko M. A., Kutsenko D. O. Comparative study of transformer-based and intelligent document analysis methods for automated extraction of medical data from PDF documents.....	85
Мельников О. Ю., Канішев В. О. Дослідження методів оцінки якості фонових оформлення сайтів для користувачів із порушеннями кольоросприйняття.....	91
Петришак Т. В., Висоцька В. А. Оцінювання здатності моделей виявлення АІ-згенерованих текстів до узагальнення в умовах невідомого генератора.....	99
Холодніак О. О., Прохоров О. В. Моделі та методи інтелектуального управління персоналізованими навчальними траєкторіями на основі інтегрованого IRT-forgetting підходу.....	104
Gamzayev R. O., Tkachuk M. V., Legenkyi G. S. Domain-specific language for intelligent testing of microservice software systems based on mock-object technology.....	115

CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY.....	4
Chernova N. L., Bezkorovainyi M. R. An intelligent system for dish-level diet planning based on an optimization model.....	4
Pavlov A. A., Kyselov M. Ye. Verification of empirical models of simplex method complexity using the modified GMDH.....	13
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....	18
Ivashchenko O. V., Filip S., Yuriev N. R. Fuzzy logic in dormitory accommodation recommendation systems: accounting for uncertainty and linguistic student preferences.....	18
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	24
Smolenskiy M. M., Sidenko Ie. V. Trusted rfid event modeling for audit, security, and provenance in patient appointment workflows.....	24
Sokol V. Ye., Hurt D. O., Godlevskiy M. D., Pashniev A. A. Modeling the influence of corporate knowledge and organizational context of an IT company on local quality criteria of the software development process.....	33
Petrov K. E., Chalyy T. V. Counterfactual model of a medical business process.....	40
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	45
Kovalenko S. V., Kovalenko S. M., Aleksandrova T. E., Malko M. M. Automated object segmentation and background removal in multimedia content processing systems.....	45
Kudriashova A. V., Oliyarnyk T. I., Slipetskiy Yu. B. Design of an information system for raster image processing.....	52
Chumachenko D. K., Liubchenko V. V. Responsibility-weighted aggregation of quality criteria in multi-layer iot software architectures.....	57
Chalyy S. F., Kravchenko R. V. Information technology for constructing explanations using temporally ordered input data of an intelligent system.....	64
Kopp A. M., Gamayun I. P., Dashkivskiy R. B., Kostin Ye. R. Information technology for optimal service placement prediction in a multi-cloud environment using machine learning.....	69
Mostovyi O. S. Control flow graph recovery for dynamically loaded code via symbolic library resolution.....	74
Leshchynska I. O. Method for verifying the balance of mental models of an intelligent system's decision.....	80
Grinchenko M. A., Kutsenko D. O. Comparative study of transformer-based and intelligent document analysis methods for automated extraction of medical data from PDF documents.....	85
Melnykov O. Yu., Kanishev V. O. Research on methods for assessing the quality of website background design for users with color vision impairments.....	91
Petryshak T. V., Vysotska V. A. Evaluating the generalization ability of ai-generated text detectors to unseen generators.....	99
Kholodniak O. O., Prokhorov O. V. Models and methods for intelligent management of personalized learning trajectories based on an integrated IRT-forgetting framework.....	104
Gamzayev R. O., Tkachuk M. V., Legenkyi G. S. Domain-specific language for intelligent testing of microservice software systems based on mock-object technology.....	115

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 1 (15) 2026

Наукові редактори: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна,
О. С. Куценко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна,
Технічний редактор: М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна.

Відповідальний за випуск М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій.
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: Mykola.Bezmenov@kpi.edu.ua

Підп. до друку 13.05.2026 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. 9,5. Облік.-вид. арк.
10. Тираж 100 пр. Зам. № 1/05/26. Ціна договірна.

Виготовлювач: ФОП Панов А. М. Свідоцтво серії ДК № 4847 від 06.02.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6, тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com