



Харківський національний університет радіоелектроніки
Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"



Kharkiv National University of Radio Electronics
State Enterprise
"Southern National Design & Research Institute of Aerospace Industries"

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості

Innovative technologies and scientific solutions for industries

Щоквартальний науковий журнал
№ 4 (30), 2024

Затверджений до друку
Науково-технічною Радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(Протокол № 11 від 28 листопада 2024 р.)

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

Quarterly scientific journal
No. 4 (30), 2024

Approved for publication
by the Scientific and Technical Council
of the Kharkiv National University of Radio Electronics
(Protocol No. 11 d.d. 28 November 2024)

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise
"National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

14 Nauky Ave., Kharkiv, Ukraine, 61166
Information site: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Ідентифікатор медіа R30-03878
Витяг з реєстру суб'єктів у сфері медіа – реєстрантів від 25.04.2024 № 1410

*Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися
результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук
наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7)*

Харків – 2024

© Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості"

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Бодянський Євгеній Володимирович,
д-р техн. наук, професор

Заступник головного редактора

Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат, д-р техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артюх Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна,
д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович,
д-р техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р мат. наук, професор (Азербайджан);
Гоєєнко Віктор, д-р техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);

Зайцева Єлена, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р техн. наук, професор;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Лемешко Олександр Віталійович, д-р техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р екон. наук, професор;
Музика Катерина Миколаївна, д-р техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович,
д-р фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р техн. наук, професор;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир, д-р техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р техн. наук, професор;
Семенов Сергій, д-р техн. наук, професор (Польща);
Сетлак Галина, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р техн. наук, професор (Фінляндія);
Телєтов Олександр Сергійович, д-р екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович,

д-р техн. наук, професор;

Філатов Валентин Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р екон. наук, професор;
Юн Джин,
канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р екон. наук, професор.

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief

Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor

Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina,
Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopeyenko Vectors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi,
PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oleksandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy,
Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Estonia);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenov Serhii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng,
PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine)

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Бронніков А. І., Бендеберя М. О.**
Розроблення кінематичної моделі маніпулятора на базі *Abb Robot Studio* (en)
- 19 **Бронніков А. І., Коломієць А. І., Юрченко О. Д.**
Система автоматизації для моніторингу роботи приладобудівного приміщення (en)
- 31 **Гавриленко С. Ю., Абдулов О. Р.**
Підвищення якості виявлення платіжного шахрайства
внаслідок використання комбінованого підходу аналізу транзакцій (en)
- 39 **Даншина С. Ю., Андрєєв С. М., Горелик С. І., Нечаусов А. С., Прийма А. С.**
Геоінформаційні технології для інженерно-геодезичних вишукувань
у процесі модернізації залізничної інфраструктури України (ua)
- 59 **Єна М. В.**
Контроль міської мобільності бпла: ройовий інтелект і уникнення зіткнень (ua)
- 67 **Калашнікова В. І.**
Аналіз та моделювання методів управління роєм безпілотних літальних апаратів (ua)
- 85 **Ляшенко О. С., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С., Пащенко О. С.**
Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній (ua)
- 97 **Тригуба А. М., Маланчук О. М., Шолудько Р. Я.**
Моделі адаптивно-ціннісного управління проєктами функціонування та розвитку
госпітальних округів (ua)
- 110 **Шантир А. С., Зінченко О. В.**
Прогнозування показників якості програмних систем із застосуванням модифікацій
інтерпретаційного методу *DeepLIFT* (ua)
- 125 **Шульга О. А., Ситніков Д. Е.**
Розроблення аналітичної інформаційної системи для аутсорсингової компанії
з використанням фактора абсентеїзму Бредфорда (ua)

Інженерія та промислові технології

- 142 **Снядовський В. Ю.**
Математичне моделювання впливу параметрів агрегації та деформації еритроцитів
на реологічні властивості крові (ua)

Телекомунікаційні системи та комп'ютерні мережі

- 153 **Мадінов М. Л., Руденко Н. В.**
Стандарти як основа інформаційно-комунікаційних технологій:
дослідження міжнародних стандартів комунікаційних систем (ua)
- 165 **Смідович Л. С., Кулик Ю. О., Момот М. О.**
Перехід оператора телекомунікацій на омніканальну архітектуру (en)
- 175 **Алфавітний покажчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Bronnikov A., Bendeberia M.**
Development of a manipulator kinematic model using Abb Robot Studio (en)
- 19 **Bronnikov A., Kolomiets A., Iurchenko O.**
An automation monitoring system for the production facility work (en)
- 31 **Gavrylenko S., Abdulov O.**
Improving the quality of payment fraud detection by using
a combined approach of transaction analysis (en)
- 39 **Danshyna S., Andriev S., Horelyk S., Nechausov A., Pryima A.**
Geoinformation technologies for engineering and geodetic surveys
in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine (ua)
- 59 **Yena M.**
Uav urban mobility control: swarm intelligence and collision avoidance (ua)
- 67 **Kalashnikova V.**
Methods of managing an automated mobile system (ua)
- 85 **Liashenko O., Starodubcev N., Makarenko H., Pashchenko A.**
Control of electromechanical systems of conveyor lines (ua)
- 97 **Tryhuba A., Malanchuk O., Sholudko R.**
Models of adaptive and value-based management of projects for the functioning
and development of hospital districts (ua)
- 110 **Shantyr A., Zinchenko O.**
Forecasting software system quality metrics using modifications
of the DeepLIFT interpretation method (ua)
- 125 **Shulha O., Sytnikov D.**
Development of an Analytical Information System for an Outsourcing Company
Using the Bradford Absence Factor (ua)

Engineering & Industry Technologies

- 142 **Sniadovskyi V.**
Mathematical modeling of the impact of RBC aggregation and deformation parameters
on blood rheological properties (ua)

Telecommunication Systems & Computer Network

- 153 **Madinov M., Rudenko N.**
Standards as a basis for information and communication technologies (ua)
- 165 **Smidovych L., Kulyk Y., Momot M.**
Telecommunication operator's transition to the omnichannel architecture (en)
- 175 **Alphabetical index**

A. BRONNIKOV, M. BENDEBERYA

DEVELOPMENT OF A MANIPULATOR KINEMATIC MODEL USING ABB ROBOT STUDIO

The **subject** of the research in the article is the application of control technology and algorithms, construction of the trajectory of movements and interaction with the production environment based on Abb Robot Studio. The **goal** of the work is the simulation of a kinematic model of the manipulator, which will allow effective performance of actions in real time, using the mathematical calculations and the Abb Robot Studio software. The article addresses the following **tasks**: to analyze the current state of integration of manipulators into production processes, as well as to choose and substantiate the development platform and robot model, to develop a kinematic model and design and write software for controlling manipulators based on mathematical calculations. The use of mathematical analysis **methods** and the theory of automatic control to simulate the operation of an industrial robot, simulation methods – to check the operation of an industrial robot model in the ABB ROBOT STUDIO environment. The following **results** were obtained: an analysis of the current state of integration of manipulators into production processes, in particular in the era of Industry 4.0, was carried out, a manipulative robot was selected and substantiated, which satisfies the mathematical calculations carried out, a kinematic model was developed, and its design was carried out, software for controlling manipulators was developed based on the conducted mathematical calculations. **Conclusions**: a model and software module were developed for the adaptive execution of the production process as part of the virtual model of the ABB IRB 1200 robot, which allows to increase the efficiency of the production process, reduce downtime, and improve product quality. The optimization of trajectories and collision management allowed to reduce the maintenance and operation costs of the robot, which led to an overall reduction in production costs, which will also be reflected in long-term use. The developed software module allows the work to quickly adapt to changes in the production process, which provides high flexibility and the ability to quickly adjust to new tasks.

Ключові слова: Industry 4.0, Abb Robot Studio, manipulator, robot, production, kinematic model, mathematical calculations.

Introduction

The rapid evolution of production processes is driven by various factors, and the adoption of automation and robotic systems plays a crucial role. Some of the key aspects of Industry 4.0 are [1–2]:

- technological advancements: the increasing power of computers and advancements in specialized software have enabled the creation of more sophisticated and efficient robotic systems. Sensors and artificial intelligence algorithms allow robots to perceive their environment, analyze data, and adapt to specific tasks effectively;

- economic considerations: enterprises strive to remain competitive, which compels them to adopt cutting-edge technologies, including robotics. Over time, the cost of robots and associated equipment has decreased significantly, making them accessible to a broader range of businesses. Implementing robotic systems can lead to cost savings and increased productivity.

- gradual improvement: enterprises often seek process improvements beyond the initial setup of production. Thoughts about automation or enhancing specific components emerge as the need to optimize efficiency and expand capabilities arises.

Installing automated areas without disrupting ongoing production is essential. This involves careful planning and integration.

The convergence of technological advancements, economic factors, and the desire for continuous improvement drives the adoption of robotic systems in production. By strategically implementing automation, businesses can enhance efficiency while maintaining control over the production process.

1. Manipulation robotics and its control as a part of manufacturing

There are a lot of publications, connected with related topic. For example, [3] describes kinematic model optimization and self-collision detection technology for a mobile manipulator, [4] considers various methods of kinematic modeling of robotic manipulators, [5] describes the basic principles of creating a kinematic model of a manipulator, [6] describes the design, modeling, and kinematics analysis of a modular cable manipulator, [7] is an overview of modern procedures of kinematic design of manipulators, [8] describes the modeling and control of a six-domed robotic

manipulator, [9] shows analysis of the work space of a four-house robotic manipulator, [10–11] describes the kinematic modeling of a robot.

In modern manufacturing environments, industrial robots play a pivotal role in various tasks, including:

- assembly: robots can precisely assemble components, ensuring consistent quality and reducing human error;
 - material handling: they efficiently move materials within production lines, warehouses, and logistics centers;
 - packaging: robots automate packaging processes, improving speed and accuracy;
 - welding and cutting: ABB robots excel in welding and cutting applications, enhancing productivity.
- ABB, a leading manufacturer of industrial robots, has significantly transformed production across industries [12]:
- productivity: ABB robots work tirelessly, leading to increased output and reduced cycle times;
 - quality: their precision ensures consistent product quality, minimizing defects;
 - safety: by handling hazardous tasks, robots enhance workplace safety for human workers;
 - flexibility: ABB robots adapt to changing production conditions, allowing rapid adjustments.

ABB's manipulative robots owe their capabilities to cutting-edge technologies and use sensors. These devices provide critical information about the robot's environment. For instance:

- position sensors: determine the robot's location and orientation;
- force/torque sensors: enable delicate handling of objects;
- vision sensors: allow robots to recognize and manipulate items accurately.

Artificial Intelligence (AI) application in robotics are:

- ABB robots leverage AI algorithms for real-time decision-making;
- they learn from experience, adapting to varying conditions;
- AI-driven path planning ensures efficient movement and collision avoidance.

D. Raina and S. K. Saha rightly emphasizes that robots empower manufacturers to respond swiftly to market demands while maintaining high-quality standards. As sensor technologies and AI continue to evolve, manipulative robots will play an even more crucial role in shaping the future of manufacturing [13].

There are the various methods of controlling robots:

a) uncontrolled method: in this method, the working body of the machine is set in motion without any specific control. It operates freely based on its inherent dynamics. Examples include simple mechanical systems like pendulums or spinning tops.

b) controlled method: controlled robots have a more deliberate approach to motion. These controlled robots are commonly used in industrial applications, where precise movement is essential. Here are two variations:

- constant speed control: the driven working body operates at a fixed speed.
- variable speed control: the robot adjusts its speed based on the task requirements.

c) program-controlled method: in program-controlled robots, an external program specifies the robot's actions. The program defines the sequence of movements, positions, and tasks. These robots follow a predetermined set of instructions, making them suitable for repetitive tasks.

d) follower method: follower robots automatically track a reference signal (usually from an external source). They maintain a certain accuracy in replicating the movement of the reference signal. Examples include robotic arms following a conveyor belt or a moving assembly line.

e) adaptive method: adaptive robots dynamically adjust their parameters based on changing operating conditions. These parameters might include speed, force, or other control variables. Adaptive control ensures optimal performance even when the environment or task changes.

The use of software-controlled methods in robotics is indeed crucial for achieving accuracy, flexibility, automation, and seamless integration within production processes.

The importance of software-controlled methods can be determined in such abilities:

- accuracy: software-controlled robots can precisely execute predefined tasks, ensuring consistent results. Whether it's assembling components or handling materials, accuracy is vital;
- flexibility: software-based control allows robots to adapt to changing conditions. You can reprogram them easily for different tasks without major hardware modifications;
- automation: by automating repetitive tasks, software-controlled robots free up human resources and improve overall efficiency;

– integration: seamless integration with existing systems streamlines production workflows.

But there are several challenges with robotic integration in modern manufacturing:

– not all robots fit seamlessly into established processes.

– this integration often requires additional resources, energy, and time. Customization becomes essential.

– the market for flexible robotic solutions can be narrow, but it's essential to find systems that align with specific production needs.

ABB RobotStudio is a powerful platform for offline programming, simulation, and optimization of robots. The key features of this program are:

– offline programming: users can create and test robotics programs on a computer without interrupting production. Direct communication with real robots allows efficient program development.

– 3D visualization and simulation: RobotStudio provides high-quality 3D visualization. Users can see how robots will perform tasks, identify issues, and make corrections before actual production. This virtual testing minimizes risks and ensures smoother implementation.

– trajectory optimization: determining efficient movement routes is critical for productivity. RobotStudio helps optimize robot paths, reducing task completion time. Especially valuable in complex processes where every second matters.

– virtual tools and sensors: virtual sensors and grippers allow realistic simulation. Online controllers visualize the robot's behavior without physical components. Debugging and fine-tuning become easier.

– AR visualization and integration: augmented reality (AR) models aid in accurate integration. Elements can be virtually projected and adjusted for seamless process alignment.

ABB RobotStudio empowers users to create, test, and enhance robotics programs efficiently. It's a valuable tool for achieving precision, safety, and productivity in robotic operations.

2. Software and robot model justification for further development

ABB Robotics is renowned for its cutting-edge robotics and machine automation systems. As a leading supplier, ABB offers a comprehensive and integrated portfolio that covers a wide range of applications, including robots, autonomous mobile robots (AMRs), and machine

automation solutions. These systems are meticulously designed and orchestrated through specialized software.

ABB's software allows precise adjustments to the robot's behavior based on the specific operating environment. This adaptability ensures optimal performance and safety.

By simulating the robot's behavior virtually, developers can fine-tune parameters without physically interacting with the robot. This minimizes risks during experimentation and system improvement [14].

Developers can create experimental scenarios within the virtual environment provided by ABB's software.

This approach enables them to explore the robot's capabilities, test control strategies, and evaluate performance without affecting the physical robot.

The ability to conduct experiments without direct interference allows for iterative development.

As the system evolves, developers can refine algorithms, optimize settings, and enhance performance seamlessly.

RobotStudio is ABB's powerful software tool for offline robot simulation. It offers:

- offline programming and simulation;
- training and optimization;
- integration with real models.

RobotStudio allows integration with any ABB robot model available in real time. For analysis, were chosen the smallest initial models: IRB 1090, IRB 1100, and IRB 1200.

Examining the IRB 1200 robot model, we can highlight several key features. Firstly, this robot is versatile and can handle a wide range of applications. Additionally, it can be installed at various angles. The design also incorporates safety considerations for working with food products. Notably, the IRB 1200 lacks a second axis displacement, resulting in a longer stroke compared to other small robots. This design choice allows the robot to be positioned closer to products, leading to a more compact installation.

Fig. 1 illustrates the robot's working range, revealing that it is fully reversible along both the x-axis and z-axis (with some exceptions in specific zones of axis change or rotation) and table 1 shows robot features.

When developing a robot [15], careful consideration of its future application environment is crucial, as it directly impacts its overall form. Decisions about the robot's purpose should be made early in the design process. Based on this defined framework, structural elements can be added as needed. Therefore, thorough material research and practical exploration of the main components are essential.

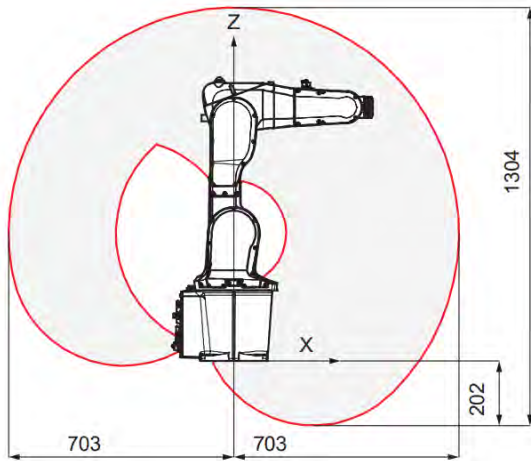


Fig 1. The working range of the IRB 1200 robot

Table 1. Features of ABB IRB 1200

Features\name	IRB 1200
Dimensions of the robot	210*210 mm
The weight of the robot	52 kg
Weightlifting capability	5–7 kg
The maximum achievable distance	0.7 m
Maximum operating speed of 1 kg of girth cargo	0.4 s
Number of articulations	6

3. The calculation part of the manipulation robot main components

The important points of our calculations will be the detection of systematic integrity and feasibility of using the chosen system. In the future, we will consider the necessary indicators and accordingly calculate the elements necessary for us for a general understanding of the principles of application of the object according to the indicators [16].

Let's start with the planned schematic display of the robot and the design of the coordinates of the direction of each functional element. As we can see in fig. 2, 6 articulations and their 5 fixed translations were defined. The construction of coordinates and reversible processes will be based on the kinematic dependence of the robot, respectively, which was depicted in fig. 3. Articulations and elongations that were equal were also depicted in the drawings:

$$d_1 = 399, a_2 = 350, a_3 = 42, d_4 = 351, d_6 = 82$$

$$q_1 (+170/-170), q_2 (+135/-100), q_3 (+70/-200),$$

$$q_4 (+270/-270), q_5 (+130/-130), q_6 (+360/-360)$$

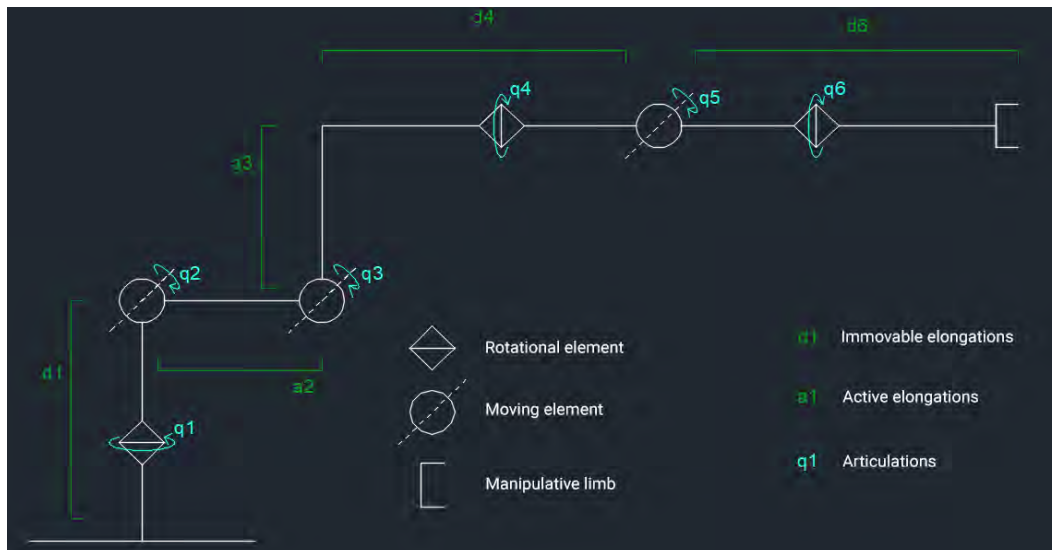


Fig 2. Schematic representation of robot kinematics

Having analyzed the parameters depicted in the design drawings, we can reproduce the table of robot features as one of the options for practice for calculating direct kinematics, considering the Denavit-Hartenberg (DH) parameters of the IRB 1200 robot model. The results were entered into the table. 2 and on figure 3.

In the future, we will determine the indicators of forward and reverse kinematics in accordance with the

given table. Adhering to the rules of calculation of elements defined by us. Matrix transformations for direct kinematics can be obtained as follows [17]:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} Cq_i & -Sq_i C\alpha_i & Sq_i C\alpha_i & \alpha_i Cq_i \\ Sq_i & Cq_i C\alpha_i & Cq_i S\alpha_i & \alpha_i Sq_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

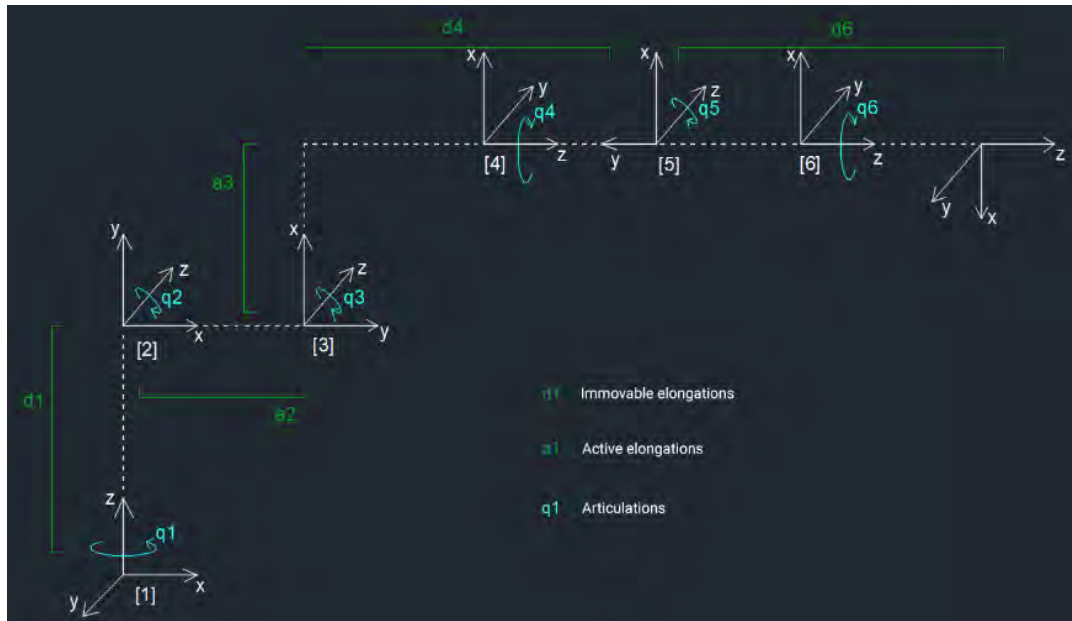


Fig. 3. Schematic representation of robot kinematics

Table 2. Denavit-Hartenberg parameter of IRB 1200 robot

	α (degrees)	d (mm)	a (mm)	q (degrees)
1	-90	d_1	0	q_1
2	0	0	a_2	$q_2 - 90$
3	-90	0	a_3	q_3
4	+90	d_4	0	q_4
5	-90	0	0	q_5
6	0	d_6	0	$q_6 - 180$

In the Denavit-Hartenberg (DH) convention for robotic kinematics, C and S are shorthand notations for cosine and sine functions, respectively.

Specifically:

- C represents $\cos(\theta)$, where θ is the joint angle.
- S represents $\sin(\theta)$, where θ is the joint angle.

Following the given formula, we derive the transformation matrix for each of the defined articulations. Having received the results for each of the articulations, we calculate the general matrix T , which indicates the location of the system associated with the end of the robot relative to the frame of reference of the robot base, which informs us about the exact position according to direct kinematics. The formula of the general position is as follows:

$$T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matrices of transformations (articulations) are presented below:

$$\begin{aligned} {}^0T_1 &= \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ C_2 & S_2 & 0 & -a_2 C_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2T_3 &= \begin{bmatrix} C_3 & 0 & -S_3 & a_3 C_3 \\ S_3 & 0 & C_3 & a_3 S_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^4T_5 &= \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} -C_6 & S_6 & 0 & 0 \\ -S_6 & -C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

The preceding equations represent the position (px, py, pz) and orientation (n, o, a) values of the end of the robot as a function of the joint coordinates q .

$$\begin{aligned}
 n_x &= \left(S_6 \left(S_4 (C_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 S_2) - C_4 S_1 \right) - C_6 \left(C_5 \left(S_1 S_4 + C_4 (C_1 C_2 C_3 + C_1 C_3 S_2) \right) + S_5 (C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3) \right) \right) \\
 n_y &= \left(S_6 \left(S_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) + C_4 C_1 \right) - C_6 \left(C_5 \left(C_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) - C_1 S_4 \right) + S_5 (C_2 C_3 S_1 - S_1 S_2 S_3) \right) \right) \\
 n_z &= -C_6 \left(S_5 (C_2 S_3 - C_3 S_2) - C_4 C_5 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \right) - S_4 S_6 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \\
 o_x &= C_6 \left(S_4 (C_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 S_2) - C_4 S_1 \right) - S_6 \left(C_5 \left(S_1 S_4 + C_4 (C_1 C_2 C_3 + C_1 C_3 S_2) \right) + S_5 (C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3) \right) \\
 o_y &= C_6 \left(S_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) + C_4 C_1 \right) - S_6 \left(C_5 \left(C_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) - C_1 S_4 \right) + S_5 (C_2 C_3 S_1 - S_1 S_2 S_3) \right) \\
 o_z &= -S_6 \left(S_5 (C_2 S_3 - C_3 S_2) - C_4 C_5 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \right) - C_6 S_4 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \\
 a_x &= C_5 (C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3) - S_5 (S_1 S_4 + C_4 (C_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 S_2)) \\
 a_y &= C_5 (C_2 C_3 S_1 - S_1 S_2 S_3) - S_5 (C_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) - C_1 S_4) \\
 a_z &= C_5 (C_2 S_3 - C_3 S_2) + C_4 S_5 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \\
 p_x &= C_1 a_2 S_2 + d_6 \left(C_5 (C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3) - S_5 (S_1 S_4 + C_4 (C_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 S_2)) \right) + d_4 (C_1 C_2 C_3 - C_1 S_2 S_3) + C_1 C_2 a_3 C_3 + C_1 S_2 a_3 C_3 \\
 p_y &= S_1 a_2 S_2 + d_6 \left(C_5 (C_2 C_3 S_1 - S_1 S_2 S_3) - S_5 (C_4 (C_2 S_1 S_3 + C_3 S_1 S_2) - C_1 S_4) \right) + d_4 (C_2 C_3 S_1 - S_1 S_2 S_3) + C_2 S_1 a_3 C_3 + S_1 S_2 a_3 C_3 \\
 p_z &= a_2 C_2 + d_1 - C_2 a_3 C_3 + d_4 (C_2 S_3 - C_3 S_2) - S_2 a_3 C_3 + d_6 \left(C_5 (C_2 S_3 - C_3 S_2) + C_4 S_5 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Next, we will consider inverse kinematics. T_0 adjust the position and orientation of the final mechanism of the robot, to reach the target object, it is most necessary to find the value of inverse kinematics. For a given position of the end effector, the connection angles that move the end effector to the specified position are determined by the inverse kinematic model. In other words, given the given 0T_6 as sixteen numerical values, the inverse kinematic solution is the corresponding articulations $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$. In the future, the kinematic solution is considered purely algebraically from direct kinematic equations:

$$\begin{aligned}
 p_x &= p_x - d_6 a_x = C_1 C_{23} d_4 + a_3 C_1 S_{23} + C_1 a_2 S_2 \\
 p_y &= p_y - d_6 a_y = S_1 C_{23} d_4 + a_3 S_1 S_{23} + S_1 a_2 S_2 \\
 \frac{p_y}{p_x} &= \frac{S_1 (C_{23} d_4 + a_{31} S_{23} + a_2 S_2)}{C_1 (C_{23} d_4 + a_{31} S_{23} + a_2 S_2)}
 \end{aligned} \tag{5}$$

We will also try to display the exact center of the robot, considering its exact coordinates, which are displayed in the description of the robot. Finding the center of the robot will help us find out the parameters by which we will be able to orient ourselves on how to better place the points of support and movement. In this way, the robot will be balanced and able to support the maximum weight, with which the small robot will be able to move a weight that is competitive enough and receptive enough for small productions or productions with light materials and short reach. Such a robot can be

The main equations for the general matrix T calculations are presented below:

aimed at automation processes with fast production and low economic capacity. Highly recommended for private businesses with a small volume of work for full automation and easier control.

So, to work out the calculations, we will set the following data:

- $d_1 = 290$ mm, $d_4 = 302$ mm, $d_6 = 72$ mm;
- $a_2 = 360$ mm, $a_3 = 70$ mm;
- $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q_6 = 0$.

$$\begin{aligned}
 {}^0_3T^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} &= {}^3_6T \\
 {}^0_3T &= {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} C_1 S_{23} & S_1 & C_1 C_{23} & a_3 C_1 S_{23} + a_2 C_1 S_2 \\ S_1 S_{23} & -C_1 & S_1 C_{23} & a_3 S_1 S_{23} + a_2 S_1 S_2 \\ C_{23} & 0 & -S_{23} & a_3 C_{23} + a_2 C_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0_3T &= \begin{bmatrix} {}^0_3R & {}^0_3P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0_3T^{-1} &= \begin{bmatrix} {}^0_3R^T & -{}^0_3R^T {}^0_3P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0_3T^{-1} &= \begin{bmatrix} C_1 S_{23} & S_1 S_{23} & C_{23} & -a_3 - a_2 C_3 - d_1 C_{23} \\ S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ C_1 C_{23} & S_1 C_{23} & -S_{23} & a_2 S_3 + d_1 S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Setting q indicators to 0 was because we estimate the position of the robot in the initial coordinates with zero values, which directly affects the accurate calculation of all positions and the middle of the robot's support. Based on this, we will receive an updated DH table (table 3) with exact coordinates and data that will help us for current calculations.

In the future, we will make calculations following first the calculations of each link in the coordinate system of the robot base, and later the calculation of the final position using the transformation matrices for each link.

As a result of the final coordinates, we will calculate the final coordinates of the position of the robot and its average coordinates. To do this, multiply the matrices step by step:

$$T = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot A_6 \quad (7)$$

Table 3. *DX parameters of the IRB 1200 robot model*

	α (degrees)	d (mm)	a (mm)	q (degrees)
1	-90	290	0	0
2	0	0	360	0-90
3	-90	0	70	0
4	+90	302	0	0
5	-90	0	0	0
6	0	72	0	0-180

Let's calculate matrix multiplication A_2 :

$$(A_1 \cdot A_2) : A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 360 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_1 \cdot A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 360 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Let's calculate the multiplication of the result by A_3 :

$$(A_1 \cdot A_2) \cdot A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 360 \\ -1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & -1 & 0 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Calculate the multiplication of the result by A_4 :

$$((A_1 \cdot A_2) \cdot A_3) \cdot A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 58 \\ -1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & 0 & 1 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

And calculate the multiplication of the result by A_5 :

$$(((A_1 \cdot A_2) \cdot A_3) \cdot A_4) \cdot A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 58 \\ -1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & -1 & 0 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Then by A_6 :

$$((((A_1 \cdot A_2) \cdot A_3) \cdot A_4) \cdot A_5) \cdot A_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 130 \\ -1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & -1 & 0 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

As a result, we considered the issue of forward and inverse kinematics using the parameters of the DX and differential Jacobian matrix. The results were described through a matrix value and expressed as exact coordinates of the position of the robot's limbs and body. The display of the position in the robot zone gives us conclusions about the correctness of the calculations and the fidelity of the construction of the robot. Thus, we can continue to implement our work and analyze its performance.

4. Practical implementation of kinematic model calculated parameters

As described earlier, our goal will be precisely to fit the robot into an already existing virtual production environment. For this, we need to display the standard process of supplying the element – plastic containers to the production area. Suppose that we have a production process for medicines that require separate processing before moving to the production line [18]. Pre-delivery was done by unloading the food machine by worker A, moving the product respectively to two conveyors for pre-treatment, corresponding to the colors of the product and appropriate disinfection with solutions. Worker B created the movement of already processed products on the line.

As we can see, the system works well except that worker B encounters already processed products, thus putting himself and, accordingly, the products at risk, thus it would be much more efficient in this situation to automate the very process of moving the processed products to production line. Based on this, let's assume that this system contains [19]:

- three conveyor belts;
- blocks with disinfection treatment of elements (function separately);
- pink plastic boxes;
- blue plastic boxes.

As a result, we can shape the system in our opinion so that it looks expedient and comprehensively formed. The result is shown in Fig. 4.

Having formed the initial production system, further automation of this process should be broken down into logical points of reproduction. Accordingly, we will receive a plan for implementing a manipulator robot under the appropriate system:

- we form manipulative limbs of the robot, according to the existing plastic containers, program them as an active tool for interaction;
- we install the robot in the production system and adjust the limits of interaction accordingly, attach the limbs;

- we install sensors to control conveyor tracks;
- we install sensors for manipulative limbs;
- we program the movement of parts and the interaction of the manipulator with them;
- we program the sequence of the process, allocate time management and check how the system functions.

First, we will form a limb for the robot, which will accordingly be built based on the previously formed box. The manipulative limb will be due to the minimum number of parts to simplify the work of the robot. For the light weight of the parts, we will make notches in the middle parts for better interaction, reducing friction and better endurance of the boxes by changing the load on the end blocks. The results are shown in fig. 5.

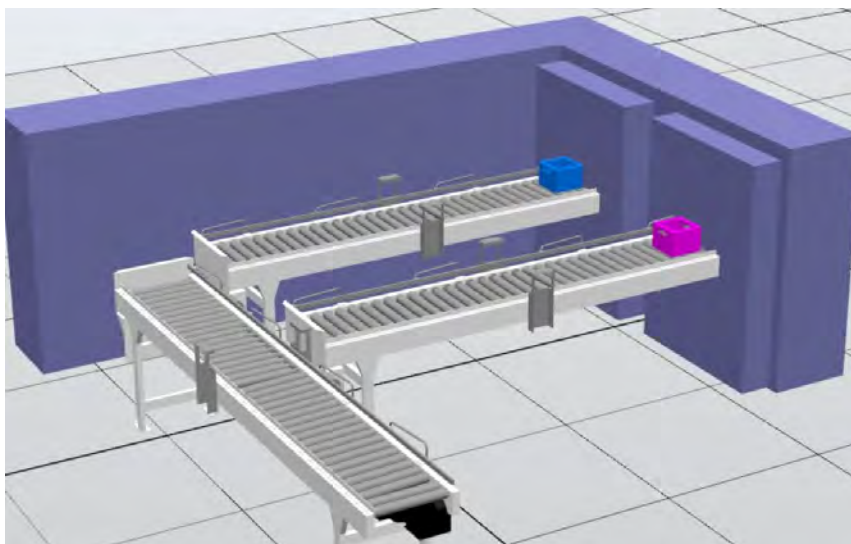


Fig. 4. Initial production system

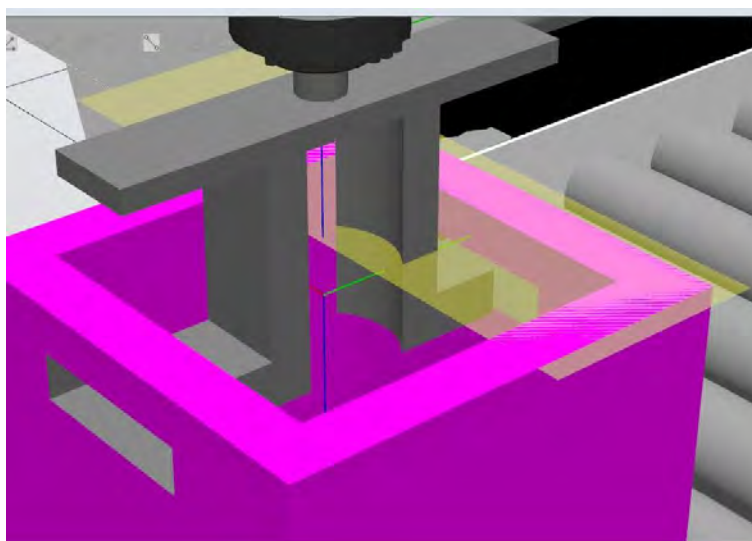


Fig. 5. Design of manipulative limbs

In addition, we will evaluate the size of the box and the robot's manipulative limb for further analysis of the robot's endurance.

The dimensions of the box are equal:

- width: 200 mm;
- height: 150 mm;
- length: 200 mm.

Thus, for the girth of the box, the manipulative limb must adjust to the box itself.

Regarding the estimation of the weight of the box, considering the dimensions and content of the filling – nutritious herbs, the box will not exceed 3 kilograms, since, considering the material of the box – plastic, the weight will be approximately 1.5–2 kilograms. Considering the herbs that will, let's say, fill the box by one third, and add a maximum of 1–1.5 kilograms to the permissible weight, the total weight will not exceed 3 kilograms.

Considering the parameters of the robot, the maximum possible value of lifting materials is 7 kilograms, thus we will be able to calculate the maximum permissible lifting weight by calculating the force [20].

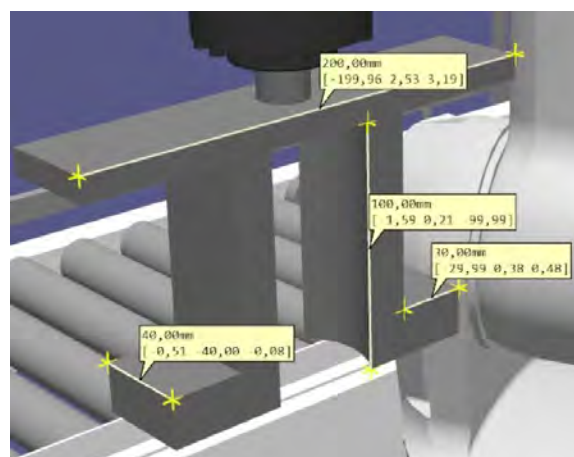


Fig. 6. Calculation details of the manipulated limb

Adjusting the robot IRB 1200_5_90_STD_03 and the controller IRB1200_5_90 into the already existing process, we put it on a stand, setting a larger radius of interaction with conveyors (Fig. 7). Which will be equal as a result:

- width: 500 mm;
- length: 500 mm;
- height: 600 mm.

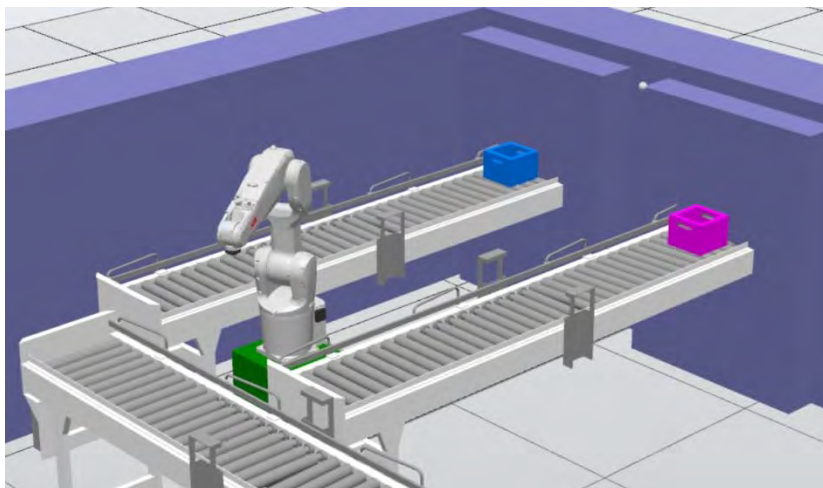


Fig. 7. Placing the robot in the system

Such parameters for the stand were set according to the height of the conveyor belt itself, which reaches 750 mm. Considering the statistical stand of the robot, the final height of the robot is compensated and as a result is equal to the optimal placement of the robot in space. We attach the manipulative limb, respectively, and set the interaction parameters, obtaining a finished model of the robot (Fig. 8).

Next, we will specify step-by-step methods of operating conveyors. In this work, I will use one of the

new functional solutions of Robot Studio – SmartComponent, which allows us to adjust functional objects quickly and efficiently. SmartComponent is one of the key functions in the RobotStudio software, which is used to simulate, program, and optimize the operation of ABB industrial robots. This feature allows users to create modular, multi-functional components that can be easily integrated into virtual environments to improve simulation accuracy and efficiency.

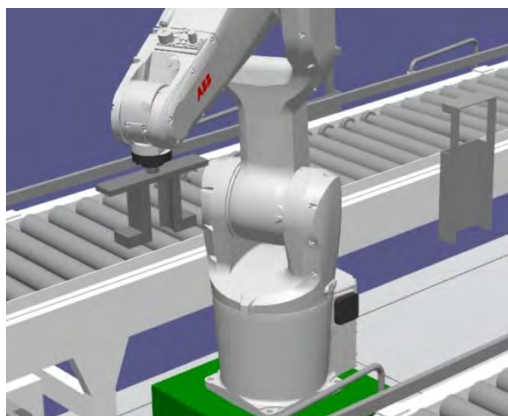


Fig. 8. The final appearance of the robot model

The overall conveyor system will consist of a sensor [21, 22], a linear motor, and an object rendering element. But the conveyor of the final line will consist only of a mover and a sensor that will move exactly the object placed on the conveyor (Fig. 9–11).

Next, we set the input and output signals for the reproduction of the process, form a block diagram of the interaction of the robot with objects (Fig. 12), form the code for successive movements and adjust the playback time.

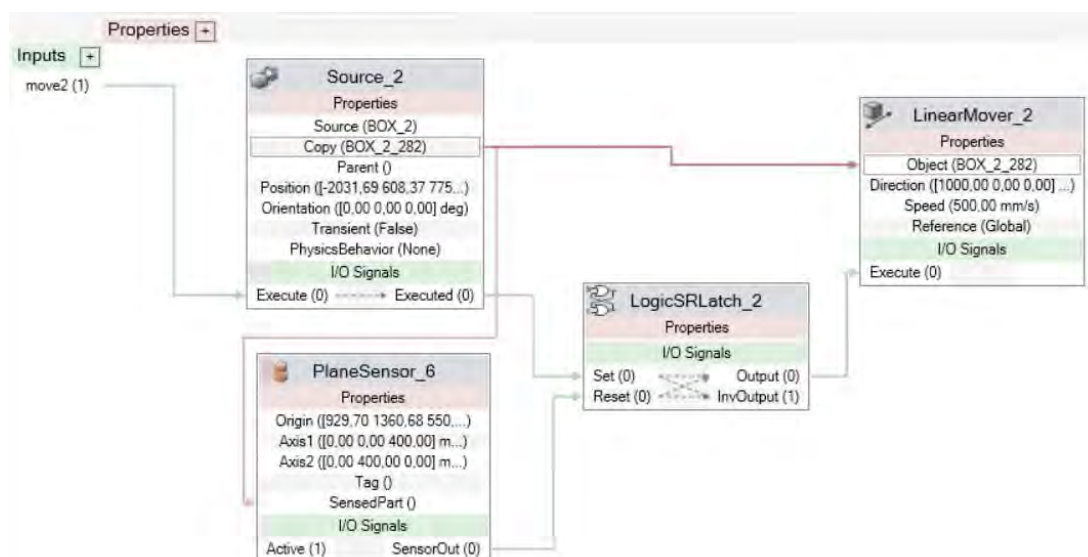


Fig. 9. Conveyor for processing pink boxes

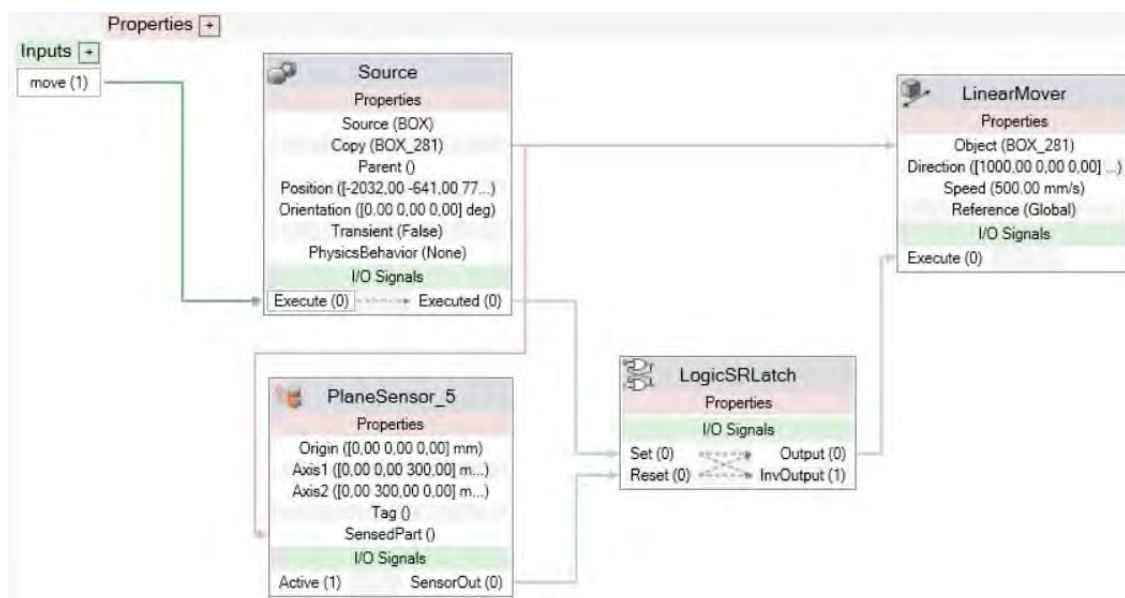


Fig. 10. Conveyor for processing blue boxes



Fig. 11. Conveyor for the final movement of boxes



Fig. 12. Scheme of robot interaction with objects

Input signals are used to receive information from various devices and sensors. They provide feedback, which is necessary for making decisions and adjusting robot actions, as well as output signals. Thus, it is important for us to specify input and output signals for sensors and controlled movement routes. To facilitate the perception of the presented signals, it is important to clarify that most of the presented signals are formed due to automated sensor and circuit reconstruction links.

Circuits, in turn, only have an input, which is used to regulate the start and end of work, without executing the complete system, you can always separate individual elements of these circuits, and try to run them independently, if the system requires it.

Thus, when reproducing the assembled system, everything functions according to the idea of operation, the movement is carried out by common detectors with the control of switching the time of delivery of objects for processing by the robot and the time of movement of the conveyor final belt, thus, the system is not reloaded

and supplies objects evenly for further processing of goods (Fig. 13).

The rearrangement of objects takes place due to automated processes, but it is important to emphasize that the passage of boxes onto the conveyors itself occurs through mechanical interventions, these processes can be synchronized, but during the processing of the project it was found that the best method would be to have a controlled element that would help accordingly in working out the system [23, 24].

As we can see, the robot performs successive steps and adapts well to the production process itself. The integration of a manipulator robot into a production system requires careful planning and the sequential execution of a few steps.

From the development of manipulative limbs to the programming of processes and the installation of sensors, each step is critical to ensure the efficient and safe operation of the system. By following all these steps, you can achieve high accuracy and productivity of an automated production system.

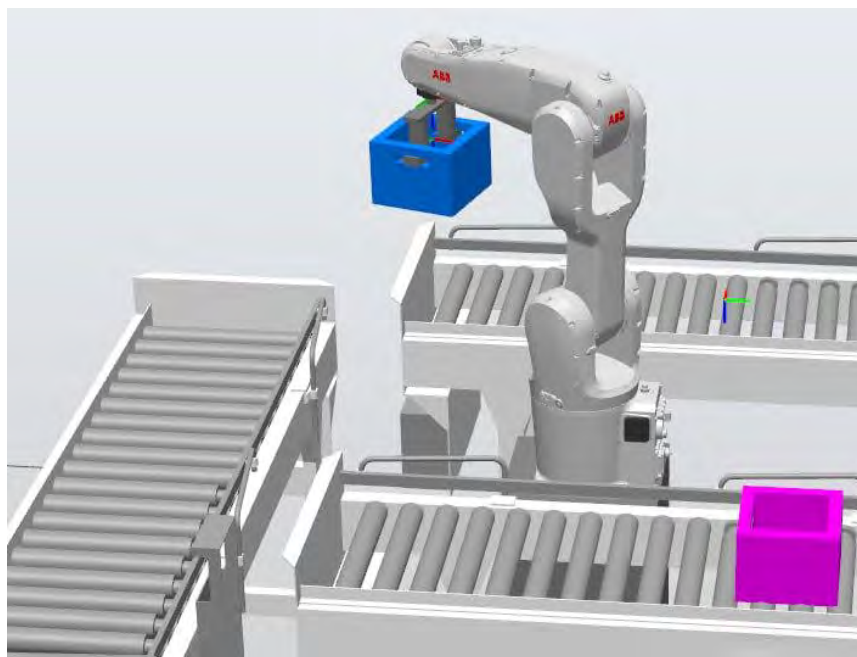


Fig. 13. Examples of robot work

Conclusions

This work can be developed using physical development capabilities and successive implementation into a functional system using a physical model control panel with a reproduced model of manipulative limbs. Also, including the control panel in the system, it will be possible to adjust the position of the robot at any point in the automated production.

The manipulative element created can be transferred to 3D printing or additive manufacturing to translate the physical model into production. So, in general, the project has room for development and future implementation, given the minimal economic burden and great opportunities to save money in a long period of time, can be used by anyone and improved, adapted to the respective projects, using the step-by-step tasks of this work.

The developed model and software module for the adaptive execution of the production process as part of

the virtual model of the ABB IRB 1200 robot. Thanks to the introduction of the adaptive manipulator robot, it was possible to increase the efficiency of the production process, reduce downtime and improve product quality. The optimization of trajectories and collision management allowed to reduce the maintenance and operation costs of the robot, which led to an overall reduction in production costs, which will also be reflected in long-term use. The use of virtual tools and simulation helped to identify and eliminate potential hazards during the planning and production process, which significantly improved the safety of the system. The developed software module allows the work to quickly adapt to changes in the production process, which provides high flexibility and the ability to quickly adjust to new tasks.

These results confirm the expediency of introducing adaptive robotic systems into production processes and open new perspectives for the further development and improvement of automation technologies.

References

1. Bendeberya, M.O. (2023), "Development of an algorithmic and functional model of a robot manipulator based on ABB Robot Studio" ["Rozrobka alhorytmichno-funktsional'noyi modeli robota manipulyatora na bazi ABB Robot Studio"]. *Automation and development of electronic devices*, Vol 2. P. 65–67. available at: https://tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnik-aded2023_2.pdf
2. Bendeberya, M.O. (2024), "Development of an algorithmic and functional model of a robot manipulator based on ABB Robot Studio" ["Rozrobka alhorytmichno-funktsional'noyi modeli robota manipulyatora na bazi ABB Robot Studio"]. *Automation and development of electronic devices*, Vol 1. P. 63–65. available at: https://drive.google.com/file/d/1OZ5_Dtlf_s--bk5_3-NAP0QUx9mAjCrf/view

3. Qiao, Lijun; Xiao, Luo; Qingsheng, Luo; Minghao, Li; and Jianfeng, Jiang (2021), "Optimizing Kinematic Modeling and Self-Collision Detection of a Mobile Manipulator Robot by Considering the Actual Physical Structure" *Applied Sciences* 11, no. 22: 10591 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112210591>
4. Singh, A.; Singla, A. (2017), "Kinematic Modeling of Robotic Manipulators". *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci.* 87, P. 303–319. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40010-016-0285-x>
5. Kirčanski, M. (1989), Manipulator Kinematic Model. In: Introduction to Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-82997-0_2
6. Ju, R. Zhang, D., Xu, J., Yuan, H., Miao, Z., Zhou, M., and Cao, Z. (2022), "Design, Modeling, and Kinematics Analysis of a Modular Cable-Driven Manipulator." *ASME. J. Mechanisms Robotics*. December 2022; 14(6): 060903. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4054206>
7. Ceccarelli, Marco; Erika, Ottaviano. (2008), "Kinematic Design of Manipulators". *Robot Manipulators. InTech*. DOI:10.5772/6198
8. Haugaløkken, B. O. A.; Nissen, O.; Amundsen, H. B.; FØre, M.; Kelasidi, E. (2021), "Modelling and control of a 6 DOF robot manipulator for underwater applications – aquaculture related case studies," *OCEANS 2021: San Diego – Porto*, San Diego, CA, USA, P. 1–10, DOI: 10.23919/OCEANS44145.2021.9706100
9. Dong, Yang; Jianzhong, Ding; Chunjie; Wang; Xueao, Liu (2021), "Kinematics Analysis and Optimization of a 3-DOF Planar Tensegrity Manipulator under Workspace Constraint" *Machines* 9, no. 11: 256 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9110256>
10. Jie, Zhao; Cuncun, Wu; Guilin, Yang; Chin-Yin, Chen; Silu, Chen; Ciyuan, Xiong; Chi, Zhang (2022), Kinematics analysis and workspace optimization for a 4-DOF 3T1R parallel manipulator, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104484>
11. Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020), Inverse Kinematics, Robot modeling and control second edition. P. 141–162. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
12. "ABB Robotics". available at: <https://new.abb.com/products/robotics> (last accessed 10.07.2024).
13. Raina, D., Saha, S. K. (2021), "AI-Based Modeling and Control of Robotic Systems: A Brief Tutorial," 3rd International Conference on Robotics and Computer Vision (ICRCV), Beijing, China, P. 45–51, DOI: 10.1109/ICRCV52986.2021.9546974
14. Ermolov, Ivan (2020), "Industrial Robotics Review". *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*, P. 195–204, DOI:10.1007/978-3-030-37841-716
15. Buri, Zsolt (2024), "Present and Future of Industrial Robotisation" *International Journal of Engineering and Management Sciences*. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2024.010>
16. Tantawi, K., Sokolov, A., Tantawi, O. (2019), "Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration". *4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON)*, P. 1–4. DOI: 10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024658
17. Soori, M., Dastres, R., Arezoo, B., Karimi Ghaleh Jough F. (2023), "Intelligent Robotic Systems in Industry 4.0, A Review". *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. DOI: 10.51393/j.jamst.2024007
18. Sethuraman, S., Vikram, S., Surya, R., Singh, B. (2024), "Applications of Cloud Computing in Industrial Robotics", *Shaping the Future of Automation With Cloud-Enhanced Robotics*, P. 181–204. DOI:10.4018/979-8-3693-1914-7.ch010
19. Alexandra, A. (2021), "Perspectives of virtual commissioning using ABB RobotStudio and Simatic robot integrator environments: a review". *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 16, Issue 3, P. 117–123. available at: https://www.researchgate.net/publication/363454592_Perspectives_of_virtual_commissioning_using_abb_robotstudio_and_simatic_robot_integrator_environments_a_review
20. Corke, P. (2019), "Manipulator Velocity: Robotics, Vision and Control", *Springer, Cham*. 229 p. available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-07262-8>
21. Leonard, Kevin & Seufferling, Tess. (2021), "Electrochemical Instrumentation", *Encyclopedia of Electrochemistry*, P. 1–33. DOI:10.1002/9783527610426.bard030104
22. Nevliudov, I., Andrushevich, A., Yevseev, V., Novoselov, S., Demska, N. (2022), "Design of mobile manipulation robots" ["Proektuvannya mobil'nykh manipulyatsiynykh robotiv"]: Monograph, *NURE publishing*, 427 p. available at: <https://catalogue.nure.ua/document=265298>
23. Nevliudov, I., Andrushevich, A., Yevseev, V. (2020), "Designing mobile robots based on single-board computers (Raspberry Pi and Python 3.6)" ["Proektuvannya mobil'nykh robotiv na bazi odnoplatsnykh komp'yuteriv (Raspberry Pi i movy Python 3.6)"], *NURE publishing*, 257 p. available at: <https://catalogue.nure.ua/document=265300>
24. Tsybal, O., Brinnikov, A. (2019), "Robot adaptation systems and OpenCV technology" ["Systemy adaptatsiyi robotiv i tekhnolohiya OpenCV"], *NURE publishing*, 144 p.: ISBN 978-966-659-268-5. available at: <https://catalogue.nure.ua/document=235947>

Бронніков Артем Ігорович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: artem.bronnikov@nure.ua; ORCID ID: 0000-0003-3096-7653

Бендеберя Марія Олександрівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: mariia.bendeberia@nure.ua; ORCID ID: 0009-0004-7528-9264

Bronnikov Artem – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Bendeberia Mariia – Kharkiv National University of Radio Electronics, Student, Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

РОЗРОБЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАНІПУЛЯТОРА НА БАЗІ *ABB ROBOT STUDIO*

Предметом дослідження в статті є застосування технології та алгоритмів керування, побудови траєкторії рухів і взаємодії з виробничим середовищем на базі *Abb Robot Studio*. **Мета роботи** – симуляція кінематичної моделі маніпулятора, що дає змогу ефективно виконувати дії в реальному часі, застосовуючи проведені математичні розрахунки та програмне забезпечення *Abb Robot Studio*. У статті необхідно виконати такі **завдання**: проаналізувати сучасний стан інтеграції маніпуляторів у виробничі процеси; обрати й обґрунтувати платформу розроблення та модель робота; запропонувати кінематичну модель та спроектувати й написати програмне забезпечення для керування маніпуляторами на основі проведених математичних розрахунків. Використані **методи**: математичний аналіз і теорія автоматичного керування для моделювання роботи промислового робота; моделювання – для перевірки роботи моделі промислового робота в середовищі *Abb Robot Studio*. **Досягнуто таких результатів**: проаналізовано сучасний стан інтеграції маніпуляторів у виробничі процеси, зокрема в епоху *Industry 4.0*; обрано та обґрунтовано модель маніпуляційного робота, що задовольняє проведені математичні розрахунки; запропоновано кінематичну модель та проведено її проектування; розроблено програмне забезпечення для керування маніпуляторами на основі проведених математичних розрахунків. **Висновки**: розроблена модель і програмний модуль для адаптивного виконання виробничого процесу в складі віртуальної моделі робота *ABB IRB 1200*, що дає змогу підвищити ефективність виробничого процесу, зменшити час простою та покращити якість продукції. Оптимізація траєкторій та управління колізіями уможливили зниження витрат на обслуговування та експлуатацію робота, що привело до загального зниження виробничих витрат, які також матимуть місце за умови тривалого використання. Розроблений програмний модуль дає змогу роботу швидко адаптуватися до змін у виробничому процесі, що забезпечує високу гнучкість і можливість оперативного переналаштування під нові завдання.

Keywords: *Industry 4.0*; *Abb Robot Studio*; маніпулятор; робот; виробництво; кінематична модель; математичні розрахунки.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бронніков А. І., Бендеберя М. О. Розроблення кінематичної моделі маніпулятора на базі *Abb Robot Studio*. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. № 4 (30). С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.005>

Bronnikov, A., Bendeberia, M. (2024), "Development of a manipulator kinematic model using *Abb Robot Studio*", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.005>

A. BRONNIKOV, A. KOLOMIETS, O. IURCHENKO

AN AUTOMATION MONITORING SYSTEM FOR THE PRODUCTION FACILITY WORK

The **subject** of research in the article is the application of technology and control algorithms in the automation system for monitoring the operation of the instrument building room. The **goal** of the work is to develop a system of simulation and monitoring of the production process. The following **tasks** are solved in the article: conducting an analysis of existing monitoring systems in production; selection of the main elements and technical means for the development of the monitoring system; development of the system component connection scheme; creating a physical layout of the system; development of software for the monitoring system of the instrumentation room. The use of mathematical and system analysis **methods**, modeling and simulation methods – to check the operation of the automated monitoring system of the instrumentation room. The following **results** were obtained: analysis and comparison of existing solutions for the implementation of monitoring systems were performed; selected hardware and technical means for developing a monitoring system; a scheme for connecting system components has been developed; the structural diagram of the system and its layout were developed; developed software for managing the monitoring system and displaying data from the database. **Conclusions:** the layout and software of the production process monitoring system, namely monitoring of water level and temperature parameters for ultrasonic washing of printed circuit boards, have been developed. The use of this type of system will lead to an overall reduction in production costs during the PCB washing operation. The developed module allows making changes in the production process without direct human intervention, which provides the possibility of quick reconfiguration for new tasks. A monitoring system control program for the main control module was developed and the principle of its operation and a graphic user interface image were given. Also, for visualization of data from the database, the software code for creating the graph and the graphical user interface were given and described.

Key words: monitoring system; automation; production process; sensor; ultrasonic PCB washer; ESP-Wroom-32; liquid flow; control system.

Introduction

The main trend of modern industry is the reduction of human influence on production activities. The modern production environment is characterized by the introduction of advanced technologies, automation of processes, increased efficiency and reliability of management [1]. To ensure stable operation, the enterprise implements monitoring systems that increase the safety of the production process by monitoring the parameters of various devices, machines, and environmental conditions. Such systems can inform about potential dangers and prevent emergency situations, ensuring uninterrupted operation of the enterprise and minimizing the impact of the human factor.

From the point of view of competitiveness, personnel turnover and occupational health and safety, monitoring systems play an important role, ensuring stable and safe working conditions, which promotes the attraction of qualified specialists and reduces risks to their health. The significant demand for monitoring systems at enterprises determines the relevance of this work.

Instrument manufacturing is a key industry that provides products to other manufacturing sectors through the creation of devices, printed circuit boards and other equipment. These products are the basis for many industries, especially those related to the manufacture of electronic products. The implementation of a monitoring system in the instrument building significantly increases the quality of products, shortens the time of production operations and ensures stable production of products [2].

The main goal of this work is to develop a system for production process simulation and monitoring. There are tasks which will be resolved in the article: an analysis of existing monitoring systems in production; selection of the main elements and technical means for the development of the monitoring system; development of the system component connection scheme; creating a physical layout of the system; development of software for the monitoring system of the instrumentation room.

There are some publications of this problem. For example, in [2] considered the development of automatic feeding machines for poultry farms, in [3] present development of monitoring system for gas leakage issue, [4] shows facility monitoring of power infrastructure

based on wireless sensor acquisition, [5] illustrates the software and architectural solutions for specialized systems that monitor the state of potentially hazardous facilities, in [6] IoT architecture is implemented to collect and determine real-time status information for remote maintenance of heat storage thermal oxidizer, [7] is an overview of the current state and future prospects of IMS in manufacturing environments, [8] shows distributed monitoring system and optimization control method, [9] describes data-driven distributed process monitoring method for industry manufacturing systems.

1. Main features of monitoring system

To solve the issues of remote management of production processes in real time, ensuring reliable and trouble-free operation of production and reducing the human factor, enterprises implement equipment and personnel monitoring systems. These systems should perform the following tasks [2]:

- data collection from sensors;
- data analysis and processing;
- storage of collected and/or processed data (local databases, cloud storage);
- display of the received data in a human-friendly form (graphs, diagrams, numerical values, indicators);
- formation of control signals for executive devices;
- creation of reports on the state of the production process.

When designing a monitoring system, it is important to consider hardware selection and software development. The hardware part must meet all requirements, including the choice of means of information storage, energy-efficient power consumption, compliance of the dimensions with the production process. The software must support the processing of large amounts of data, perform high-load calculations, work in asynchronous mode, generate output signals for executive devices and, if necessary, have open-source code [10].

The production process generates information about the state of individual components or the entire process, which is processed by the monitoring system. After data processing, output signals are formed for executive devices, which allows effective management decisions to be made from a remote access point. The analysis of the implementation of monitoring systems in production puts forward the following points:

- high level of software support thanks to rapid deployment technologies;

- easy system scaling by adding new monitoring parameters and/or alarm modules;
- low cost and easy application in production compared to similar monitoring systems;
- instrumentation room monitoring systems can include many parameters that they monitor, depending on the manufacturing processes being monitored.

The process of washing printed circuit boards was chosen for the development of the monitoring system of the instrumentation room [11]. This process is an important stage in the production of electronic devices, since the printed circuit board serves as the basis for the assembly of electronic components. The cleanliness of the printed circuit board directly affects the reliability and performance of the final product. Residues of flux, dust, oil and other contaminants can lead to corrosion, electrical leakage, short circuits and other malfunctions.

The main reasons for the importance of the process of washing printed circuit boards:

- ensuring reliable and trouble-free operation of the device and reducing the risk of failure during operation.
- corrosion protection by eliminating aggressive chemicals that can corrode copper tracks and solders.
- improvement of adhesion of soldering materials to tracks and contact areas.
- compliance with quality standards for high-tech industries such as aviation, medical technology, etc.

There are several methods of washing printed circuit boards:

- manual washing;
- jet washing;
- ultrasonic cavitation;
- steam washer.

Manual washing of printed circuit boards is the simplest and basic method of removing dirt, flux residues, dust, oil. This method is used for small productions where automated washing systems are not used. Figure 1 shows the process of manual PCB washing [12].

Advantages of manual washing of printed circuit boards:

- flexibility in working with different types of boards and pollution;
- low cost and simplicity of equipment (cloths, cotton swabs, brushes, isopropyl alcohol);
- full control over the process.

Disadvantages of manual washing of printed circuit boards:

- labor intensity of the process, which takes a lot of time and effort;

- risk of damage to the board, which may lead to the failure of the device;
- risk of operator disease during the process without adequate protection.

Jet washing of printed circuit boards method uses special equipment that uses high-speed jets of washing solution. Special solutions are sprayed onto the board, providing effective removal of contaminants. Fig. 2 shows PCB jet washing machine.

The process of jet washing printed circuit boards begins with loading the boards into the equipment using special holders or a transport belt. At the next stage, special nozzles spray the washing solution.

Then, under high pressure, powerful jets of washing solution are created, which are directed at the printed circuit boards, which allows you to wash off dirt thanks to the high pressure and speed of the jets. After that, the boards are washed with clean water to remove the remnants of the washing solution and impurities, and then undergo a drying process using hot air or infrared lamps [13].

Ultrasonic washing of printed circuit boards is one of the most effective methods of washing surfaces. It uses ultrasonic waves to create cavitation in the liquid, resulting in effective washing of circuit board surfaces.

Ultrasonic cleaning of printed circuit boards is carried out in special installations consisting of a liquid tank, oscillating systems and an ultrasonic generator. The boards are immersed in the liquid, after which the generator and oscillating systems create vibrations in the ultrasonic range, which cause the formation of cavitation bubbles. As these bubbles grow, they explode, creating a stream of liquid that dissolves impurities on the circuit board. The process of formation and explosion of bubbles is shown in Fig. 1.

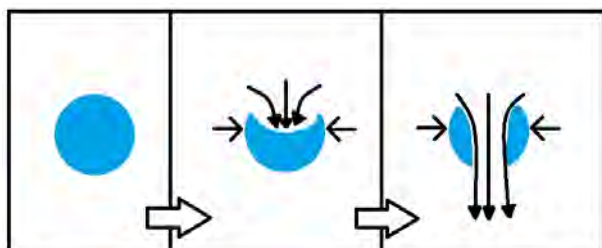


Fig. 1. The process of formation and explosion of bubbles

Ultrasonic cleaning usually provides a deeper cleaning due to cavitation, which allows to remove dirt from the smallest crevices and from under components. While jet cleaning can be faster for simple boards,

ultrasonic cleaning usually provides a higher cleaning quality, although it takes a little longer. Ultrasonic cleaning requires special ultrasonic baths, while jet systems can be more versatile but less effective for complex tasks. Ultrasonic cleaning is ideal for boards with high component density and complex geometries, while jet cleaning may be more suitable for high volume standard boards.

Based on the analysis of modern production and its monitoring systems, the following requirements can be put forward to the developed system [14]. The system should have integrated sensors for collecting information, its processing and analysis, as well as data storage. The remote graphical user interface must display all the functions of the hardware part of the system and can generate control signals for executive devices. It is also necessary to implement a reporting form that will display the state of the system at each defined time interval for further optimization and improvement of the system.

Ultrasonic cleaning of printed circuit boards was chosen as the production process, as this method provides more thorough and high-quality cleaning of flux residues and is suitable for boards of different geometries.

2 System model justification for further development

The selected technical means for the development of the monitoring system can fully realize the necessary functionality [15].

The connection diagram of the monitoring system is shown in Fig. 2.

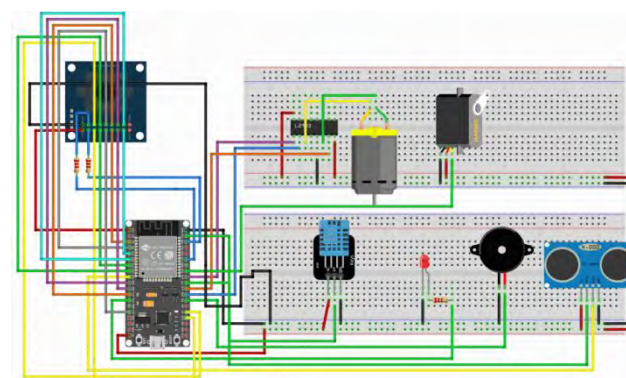


Fig.2. Connection diagram

The diagram shows the hardware parts of the monitoring system. The system uses the ESP-WROOM-32 module, which is responsible for collecting data from sensors, calculating and analyzing them, sending them to

the database, and implements interaction with the graphical interface (web server).

All other components are connected to the ESP-WROOM-32. The OV7670 module is responsible for a surveillance camera that allows you to monitor the process directly from a remote access point. The ultrasonic distance sensor HC-SR04 collects information about the water level in the bathtub. The temperature and humidity sensor DHT11 collects information about liquid

temperatures. There are two executive devices in the system – a SG90 servo motor and an electric motor. The servomotor simulates the operation of the liquid drain valve, and the electric motor is responsible for stirring the liquid. The electric motor is connected to the ESP-WROOM-32 board thanks to the L293D motor driver. Table 1 provides a description of all devices and electronic components in the diagram in Fig. 3, which are used in the developed system.

Table 1. Description of the purpose of the devices

Device name	Quantity, pcs	Purpose/description
ESP-WROOM-32	1	Control Board
OV7670	1	Camera
DHT11	1	Temperature and humidity sensor
HC-SR04	1	Ultrasonic distance sensor
SG90	1	Servo
Світлодіод	1	Red LED for fault indication
Резистор 220 Ом	1	Step-down resistor for LEDs
Резистор 2,2 кОм	2	Resistors for connecting the camera via the I2C interface
L293D		Motor driver
Buzzer	1	Active piezo element for fault signaling

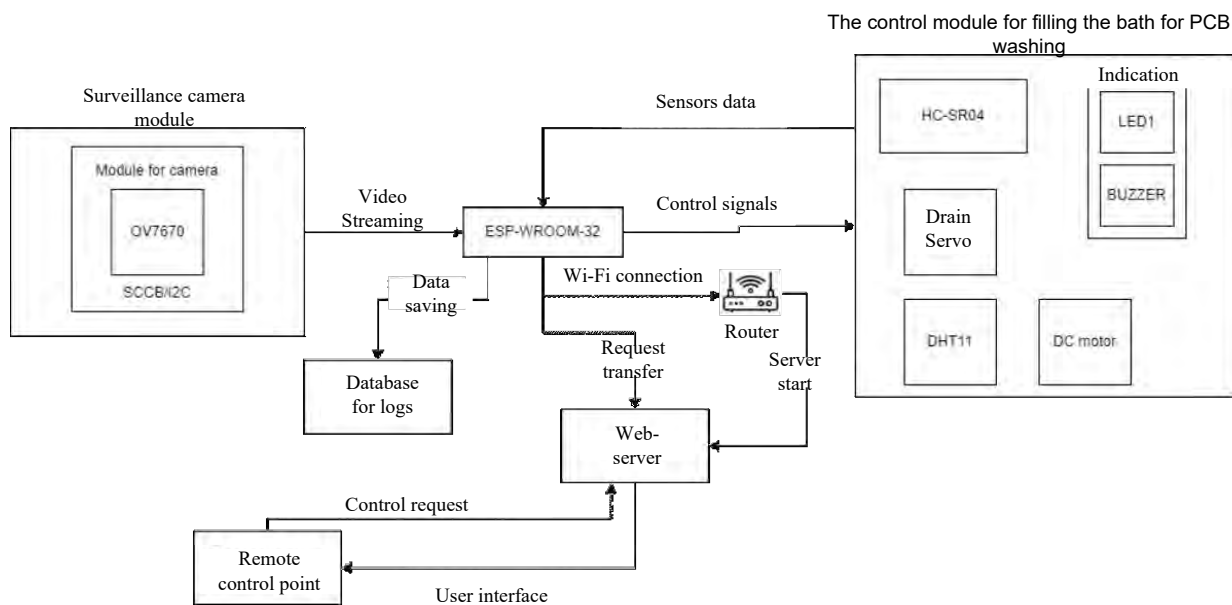


Fig. 3. Structural diagram of system

A structural diagram is a representation of the main parts and the relationships between them of any kind of system, object and other products.

The structural diagram reflects the general structure of the system, which is defined in the following.

The main control module is the ESP-WROOM-32, which receives various types of data from the system modules.

From the surveillance camera module, which consists of the OV7670 camera itself and the board to which the camera is connected, which allows the entire module to be connected to the control module using the SCCB interface (analog I2C), the ESP-WROOM-32 receives the current frame that was captured, for a certain period of time, which determines the speed of receiving the video stream. ESP-WROOM-32 receives the current

level values from the bath filling control module for DP washing, which consists of an ultrasonic sensor HC-SR04, a temperature and humidity sensor DHT11, a servo motor SG90, an electric motor and an indication and signaling module (LED and piezo speaker) water in the bath, the temperature of the washing liquid and the state of these parameters from the display and alarm module [16].

The system has a graphical user interface that is hosted on a web server that is started and maintained on the ESP-WROOM-32 by connecting to a router access point via WiFi.

On ESP-WROOM-32, requests to the web server are created, which are processed on the server and display the necessary information to the user or provide the necessary functionality.

The user can control the system from a remote access point thanks to the technology of creating a local web server and connecting to it through a local IP address. The remote-control point receives all the information that is located on the web server, providing a user experience. User experience (UX) is how a user interacts with a product, system or service and receives experience from them. It includes a person's perception of usefulness, ease of use, and effectiveness [18].

3. Calculation of system parameters

The developed system uses ultrasonic cleaning of printed circuit boards as an emulation of the production process. The installation of radio-electronic components on the DP is accompanied by a residual flux that prevents the provision of high insulation resistance of the board, which can lead to the failure of the board, cause a short circuit, etc. Today, ultrasonic cavitation in a cleaning solution is most often used to clean the circuit board from flux residues [19]. Ultrasonic baths and special solutions or water-based cleaning fluids are used to provide ultrasonic washing technology.

The system under development has a control module for filling the bath for washing the DP, which simulates a real production process. An ultrasonic bath for washing printed circuit boards is an important component in the process of manufacturing electronic devices. Adequate filling of the bath with cleaning liquid and accurate knowledge of the pressure created by the liquid at different levels are critical to ensure an efficient and safe cleaning process [20]. Fig. 4 shows a representation of an ultrasonic bath.

The given Fig. 7 shows the valve that provides draining of the liquid into the bath and several characteristics of the bath, namely H - the height of the bath 0.175 m, h - the height of filling the bath with liquid 0.15 m, the density of the liquid, for example ZESTRON FA+, 940 kg/m^3 .

Under the influence of gravity, the hydrostatic pressure increases with the increase in the height of the liquid column, that is, with the height of filling the container. Thus, the pressure of the washing liquid at the bottom of the bath is approximately 1383.2 Pa.

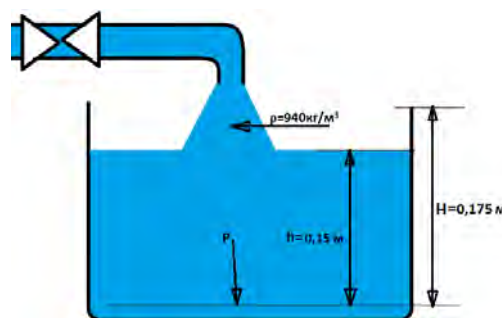


Fig.4. Representation of an ultrasonic bath

To choose the necessary ultrasonic bath, it is also necessary to calculate the mass that will be occupied by the washing liquid in the bath. The maximum volume that the printed circuit board will occupy is $0.15 \times 0.08 \text{ m}$, because the developed system is used for washing small electronic boards.

In this way, we get the mass that will be occupied by the washing liquid in the bath, 1.451 kg.

Based on these calculations, the Jeken PS-06A [21] ultrasonic bath was chosen, the appearance of which is shown in Fig. 5.



Fig. 5. Ultrasonic bath Jeken PS-06A [19]

The main characteristics of the Jeken PS-06A ultrasonic bath are listed in Table 2.

Table 2. Features of the Jeken PS-06A US-bath

The name of the characteristic	Meaning, description
Volume	600 ml
Ultrasound power	50W
Ultrasound frequency	40000 Hz
Tank material	Stainless steel
Tank dimensions (internal)	150x85x65 mm
Dimensions of the device	175x110x155 mm
Weight	1,35 kg

The measuring range of the HC-SR04 ultrasonic distance sensor is from 0 mm to 1500 mm with a resolution of 3 mm. The principle of operation of the sensor consists in releasing an ultrasonic pulse and receiving a reflected pulse at the receiver. The time it

took for the pulse to pass from the beginning of the emission to the reception of the echo signal at the receiver allows you to calculate the distance to the object.

Suppose that the pulse transit time (t) was 40 Ms. Since the time measured by the sensor includes the path of the pulse from the transmitter to the object and back to the receiver, which are equal, then the resulting time must be divided in half. Based on the results of the calculation, the distance to the object is 6.86 m.

4. Practical implementation of monitoring system

To develop any system, it is important to understand the algorithm it executes. An algorithm is a finite sequence of well-defined instructions that are used to solve a given task. Fig. 6 shows the algorithm of the monitoring system [22].

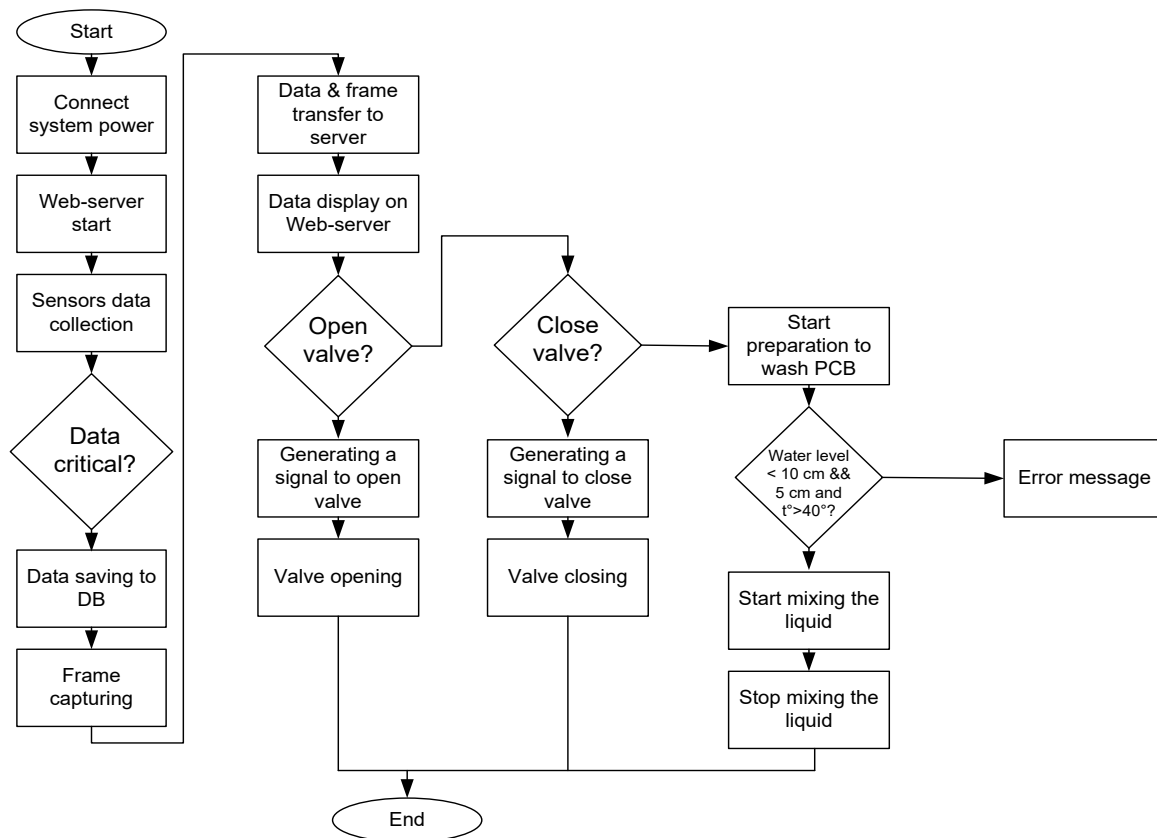


Fig. 6. System operation algorithm

The task for the developed monitoring system is to collect data from sensors, determine the critical state of the monitored parameters, display the collected data and video stream from the surveillance camera to a remote-control point.

When power is connected to the system, a local web server is started, which is broadcast to a remote access point, which provides remote control of the system. Data is collected from the sensors, which are processed, if necessary (data from the ultrasonic sensor

is processed to obtain the required value), the camera captures frames, and all this is sent to the web server to display the received data and video stream. Next, the user can choose the desired function to perform. When selecting the "Open the valve" function, the system generates a signal to the executive device (servo motor) to open the valve. When selecting the "Close the valve" function, the system generates a signal to the executive device (servo motor) to close the valve. When selecting the function "Preparation for washing the DP", a check is made for the compliance of the parameters, namely the temperature value should be more than 40° and the water level should be less than 10 cm and more than 5 cm. If the condition is true, then a signal is generated to start the liquid mixing process. If the condition is false, the system reports an error and returns to the function selection.

Software development is accompanied by the selection of appropriate software tools that allow you to conveniently and efficiently create software.

Arduino IDE was chosen to create the main software to control the whole system.

Arduino IDE is an integrated development environment, which is a cross-platform application that allows you to create and load programs on Arduino-compatible boards and boards of other manufacturers [23]. The development environment includes a code editor, functions for compiling projects and downloading programs to the board. The platform supports C/C++ programming languages. The Arduino IDE also includes a message area (port monitor) for monitoring messages, a text console, a toolbar with buttons for common functions, and a hierarchy of operational menus. In the latest versions, the function of autocompletion, more convenient navigation through the code and the debugging function (debugger) have been added.

Designing a database structure consists of identifying the needs for which database input is required. In the developed system, it is necessary to store information about the past values and states of the monitored parameters to obtain a complete view of the system's operation over a period. Thanks to data storage in the database, it is possible to track sensor reading errors in the future for debugging and improving the system.

The main parameters that must be saved in the database are temperature, water level, the state of the DHT11 sensor, the state of the HC-SR04 sensor and the time of recording data to the database.

In the developed system, the parameters that are to be saved in the database are highlighted:

- unique id;
- temperature value;
- water level value;
- state of temperature and humidity sensor DHT11;
- state of the HC-SR04 ultrasonic distance sensor;
- the time of writing data to the database.

Based on the described needs and parameters for storage, you can describe the table of entities that will be in the database (Table 3).

Table 3. Storing data from sensors

Field name	Data type	Description
id	int	auto_increment
temperature	int	no_null
distance	int	no_null
dht_state	tinyint	no_null
ultrasonic_state	tinyint	no_null
log_time	datetime	current_timestamp()

Management and administration of the database takes place using phpMyAdmin, therefore, the creation of the database and tables took place through the interface of this environment. Fig. 7 shows the general view of the database.

As noted, the database is designed to store sensor data and track sensor reading errors for system debugging and improvement.

To process data from the database, a Python script was developed that connects to the created database, extracts data, processes it and displays it in the form of a graph.

Fig.8 shows the window of the program that displays data from the database in the form of a graph.

This application presents a Python program using the PyQt5 and matplotlib libraries to create a graphical user interface (GUI) that allows you to visualize data from a database.

The program interface has a menu of tools that allow you to manipulate the graph (zooming, navigating the graph, setting graph parameters, saving as a picture). The next element is the graph itself. Below are two date and time input fields, which are responsible for the time from which data from the database should be output in the form of a graph. The "Update graph" button is responsible for updating the graph, namely reading data from the date and time fields, then connecting to the database and creating an SQL query to the database to extract exactly those data that fall under the specified time.

This application presents a Python program using the PyQt5 and matplotlib libraries to create a graphical

user interface (GUI) that allows you to visualize data from a database.

#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra	Action
☐	1 id	int(11)			No	None		AUTO_INCREMENT	Change Drop More
☐	2 temperature	int(11)			No	None			Change Drop More
☐	3 distance	int(11)			No	None			Change Drop More
☐	4 dht_state	tinyint(1)			No	None			Change Drop More
☐	5 ultrasonic_state	tinyint(1)			No	None			Change Drop More
☐	6 log_time	datetime			No	current_timestamp()			Change Drop More

				id	temperature	distance	dht_state	ultrasonic_state	log_time
☐				1	19	6	0	0	2024-05-05 13:56:03
☐				419	24	3	0	1	2024-05-05 16:46:15
☐				420	24	7	0	0	2024-05-05 16:46:20

Fig. 7. General view of the database in phpMyAdmin



Fig. 8. Python program for displaying data graphs from the database

The program interface has a menu of tools that allow you to manipulate the graph (zooming, navigating the graph, setting graph parameters, saving as a picture).

The next element is the graph itself. Below are two date and time input fields, which are responsible for the time from which data from the database should be output in the form of a graph. The "Update graph" button is responsible for updating the graph, namely reading data from the date and time fields, then connecting to the database and creating an SQL query to the database to extract exactly those data that fall under the specified time.

The system under development includes various components such as temperature and water level sensors, servo motors, a camera, as well as Wi-Fi connectivity and web server control.

The Arduino IDE has many built-in modules and functions that allow you to create programs, but for the system under development, you need to connect some libraries using the package manager of the development environment.

This will help you efficiently create program code without creating add-ons, namely libraries for working with Wi-Fi (WiFi.h), asynchronous web server

(ESPAsyncWebServer.h), servo motors (ESP32Servo.h), HTTP requests (HTTPClient.h), DHT11 temperature and humidity sensor (DHT.h), OV7670 camera (OV7670.h), and to manage events using Ticker.

An asynchronous web server based on the ESPAsyncWebServer library for ESP32 allows you to process HTTP requests asynchronously, which provides greater efficiency and speed of processing requests compared to conventional synchronous servers.

The basic principle of an asynchronous web server is asynchrony. An asynchronous server allows you to process multiple requests at the same time without blocking program execution while waiting for responses. This is achieved by using asynchronous request processing techniques that do not delay the main flow of application execution. An asynchronous server is event driven. When the server receives a request, the corresponding callback function is called to process the request. These functions are executed asynchronously, which means that they do not block the main execution flow of the application. After processing the request, the server sends a response to the client [24]. This approach makes it easy to define different handlers for different routes (URLs). Also, thanks to asynchrony, the server uses resources more efficiently, which is especially important for limited hardware platforms such as ESP32.

The following are the advantages of an asynchronous web server:

- processing of several requests at the same time, without waiting for the completion of processing of each request;
- reducing delay and increasing the efficiency of resource use;
- easily handle many simultaneous connections without significant performance degradation.

The principle of operation of the asynchronous web server in the developed system is as follows. The ESP32 connects to the Wi-Fi network using the specified SSID and password. This allows access to the web server from other devices on the same network. The AsyncWebServer object is created on port 80. This means that the server will listen for HTTP requests on the default port 80. The server handles several routes for interacting with the user through the web interface:

- sends an HTML page with a user interface ("/");
- returns sensor data in JSON format ("/sensor_data");
- returns the image from the camera in BMP format ("/camera");
- opens the valve ("/open_valve");

- closes the valve ("/close_valve");
- starts the process of preparation for washing the DP ("/start_washing").

Next is the definition of global variables that are responsible for connecting to the various sensors and actuators, namely the pins for connecting the OV7670 camera, electric motor, piezo driver, LED, DHT11 temperature and humidity sensor, HC-SR04 ultrasonic distance sensor, SG90 servo motor. Also under this category are those variables that are central to the entire project, such as motor speed, WiFi access point password and name, variables to record the current temperature and water level, database connection address, logical constants to determine the state as running of the process of preparing the bath for washing the DP, as well as the observed parameters. Also, the global scope defines objects of classes and structures from the added libraries that facilitate the software development process, namely an asynchronous web server object that runs on standard port 80, a servomotor object that is responsible for a gate, an object timer objects from the Ticker library, which allows you to run routine tasks and call functions asynchronously without using the delay() function, a camera object to capture a frame on the camera, and a BMP file header so that the client can correctly interpret the received data as an image in BMP format.

The main functions that are presented in the software:

- setup() – initialization of all components;
- loop() – cyclic execution of the program (empty, because the asynchronous web server processes requests independently and not sequentially);
- saveToDB() – sending data to the database via an HTTP request;
- SendHTML() – creating an HTML page for the web interface;
- tempSensor() – reading the temperature from the DHT11 sensor and writing to the corresponding variable;
- soundSensor() – reading the distance from the HC-SR04 sensor and writing to the corresponding variable;
- openValve(), closeValve() – servomotor control functions (valve opening and closing);
- stepperRotate(), stepperStop() – electric motor control functions (starting and stopping the motor);
- handleRoot() – a request to send an HTML page to the server (root path);
- handleSensorData() – request to update data from the sensors of the HTML page on the server;

- handleCameraStream() – request to update frames from the camera (forming a video stream) of the HTML page on the server;
- handleOpenValve(), handleCloseValve() – requests to open and close the valve, respectively.

handleStartWashing() – a request to start the process of preparing a bath for washing DP.

Conclusion

An analysis of modern production was carried out, the main development trends were considered. The implementation of new systems and technologies that ensure the reliability of work at the enterprise was analyzed.

During the work, the subject area of the monitoring system of the production process of ultrasonic cleaning of printed circuit boards was studied, its implementation at the enterprise, modern analogues were analyzed, which made it possible to form requirements for the development of one's own monitoring system.

The selection and justification of the main elements and technical means that will allow to develop a monitoring system was carried out.

A connection diagram of system components was developed as a laboratory layout, which made it possible to understand the structure of the future physical layout. A structural diagram was developed that reflects the architecture of the developed system.

Calculations of the hydraulic pressure of the washing liquid for washing the DP were carried out, which made it possible to choose the necessary ultrasonic bath. Calculations of the automatic control system were carried out to determine the value of the components and the general control signal of the PID controller to stabilize the temperature indicator for heating the washing liquid in the bath, and the calculation of determining the distance to the object, namely the

determination of the water level in the bath, through an ultrasonic sensor was carried out distance

An algorithm of the system's operation was developed, which made it possible to form the principle of the software's operation.

A physical layout of the system was assembled with the specified connection of elements to the main control module.

The choice of software development tools was argued, the structure of the database was developed for saving and visualizing the observed parameters.

A monitoring system control program for the main control module was developed, its functionality was described, the principle of its operation and a graphic user interface image were given. Also, for visualization of data from the database, the software code for creating the graph and the graphical user interface were given and described.

As a result of the implementation of the project, the main goal was fulfilled, namely, the layout and software of the production process monitoring system was developed, namely, the monitoring of the parameters of the water level and temperature for ultrasonic washing of printed circuit boards.

In future research the following will be added:

- studying the possibilities of using machine learning and artificial intelligence to automate and increase the efficiency of monitoring production processes.
- research on methods of optimizing energy consumption in instrument-making premises using automated monitoring and control systems.
- development of algorithms and methods of increasing the safety and reliability of automated monitoring systems in conditions of various production risks.
- exploring the possibilities of creating adaptive systems that can automatically adjust to changes in the production process.

References

1. Zhurakovsky, B. Yu., Zeniv, I. O. (2021), "Technologies of the Internet of Things. Study guide" ["Tekhnolohiyi internetu rechey. Navchal'nyy posibnyk"]. Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 271 p.
2. Tsmots, I. G. (2018), "System for monitoring technological processes of the "smart enterprise" ["Systema monitorynhu tekhnolohichnykh protsesiv «rozumnoho pidpryemstva"]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" "Information systems and networks"*. No. 887, P. 10–17.
3. Sumitra, Goswami (2020), "Arduino Based Automatic Feeding & Cooling System for Poultry Farm", *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Vol. 8, Is. 11, P. 37–42. DOI: 10.17148/IJIREICE.2020.81105

4. Kishore, Kumar R, Nishanth, N, Suriya, Prakash S K, Dhanush, Anand S B (2021), "IOT based industrial monitoring system using Arduino", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 08, Is. 08, P. 4147–4149. available at: <https://www.irjet.net/archives/V8/i8/IRJET-V8I8486.pdf?form=MG0AV3>
5. Jin, Long & Wang; Zhong, Hu; Deming, Bai; Yuehua, Ji; Shuanmei, Liu; Hao, Yang Ruifeng (2024), "Data node fusion method for on-site facility monitoring of power infrastructure based on wireless sensor acquisition". *Journal of Physics: Conference Series*. 2835. 012043 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2835/1/012043
6. Sokolovskiy, Vladyslav; Zharikov, Eduard; Telenyk, Sergii (2024), "Using expert evaluation for selecting an architectural solution for a specialized software system that monitors the state of potentially hazardous facilities". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5. P. 27–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.312886
7. Jang, Chi Yoon; Dal, Jang; Myung, Jeong; Jae, Kim; Ji, Kim; Min, Park; Hoon, Lim Tae (2024), "Implementing an Edge-IoT System for Real-Time Information Gathering of RTOs: Implementing Architecture for IoT Data Collection". *Forum of Public Safety and Culture*. 34. P. 33–50. DOI: 10.52902/kjsc.2024.34.33
8. Olajiga, Oladiran; Ani, Emmanuel; Olu-lawal, Kehinde; Montero, Danny; Adeleke, Adeniyi (2024), "Intelligent monitoring systems in manufacturing: current state and future perspectives". *Engineering Science & Technology Journal*. 5. P. 750–759. DOI: 10.51594/estj.v5i3.870
9. Wang, Hao; Luo, Hao; Ren, Lei; Huo, Mingyi; Jiang, Yuchen; Kaynak, Okyay (2024), "Data-Driven Design of Distributed Monitoring and Optimization System for Manufacturing Systems". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. P. 1–10. DOI: 10.1109/TII.2024.3383491
10. Yin, Ming; Tian, Jiayi; Zhu, Dan; Wang, Yibo; Jiang, Jijiao (2023), "A data-driven distributed process monitoring method for industry manufacturing systems". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 46 p. DOI: 10.1177/01423312231195365
11. He, Hai; Zhou, Jian; Hu, Wenqiang; Wang, Yuhui (2024), "Research on reconfigurable systems in discrete manufacturing workshops". *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2842. 012071., 8 p., DOI:10.1088/1742-6596/2842/1/012071
12. Kim, Ha-Yeong; Kim, Jiwon; Chu, Yeon-Ryong; Jekal, Suk; Minki, Sa; Kim, Changyo; Park, Gyu-Sik; Lim, Jisu; Otgonbayar, Zambaga; Yoon, Chang-Min (2024), "Traceback Analysis of Unknown Nanoparticles Formation Mechanism on OSP Surface Finished PCB for Flip-Chip Package". *IEEE Access*. Vol. 12. P. 97132–97142. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3427728
13. Piccolo, Alessandro; Martino, Antonio; Scognamiglio, Francesco; Ricci, Roberto; Spaccini, Riccardo (2021), "Efficient simultaneous removal of heavy metals and polychlorobiphenyls from a polluted industrial site by washing the soil with natural humic surfactants". *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 28. P. 25748–25757, DOI: 10.1007/s11356-021-12484-x
14. SMT prof. "SMART solutions for electronics production" ["SMART rishennya dlya vyrobnystva elektroniky"], available at: <https://smt-prof.com.ua/ua>. (last accessed 02.11.2024).
15. "Washing PCBA | ultrasonic or spray washing systems?", available at: <https://www.zestron.com/en/know-how/factchecks/washing-pcbs-ultrasound-spraying> (last accessed 05.11.2024).
16. Olajiga, Oladiran; Ani, Emmanuel; Olu-lawal, Kehinde; Montero, Danny; Adeleke, Adeniyi (2024), "Intelligent monitoring systems in manufacturing: current state and future perspectives". *Engineering Science & Technology Journal*. Vol. 5. P. 750–759. DOI: 10.51594/estj.v5i3.870
17. Hailan, Maryam; Ghazaly, Nouby; Albaker, Baraa (2024), "ESPNow Protocol-Based IIoT System for Remotely Monitoring and Controlling Industrial Systems". *Journal of Robotics and Control (JRC)*. Vol. 5. P. 1924–1942. DOI: 10.18196/jrc.v5i6.21925
18. Vinod, Sredha; Shakor, Pshtiwan; Sartipi, Farid; Karakouzian, M. (2023), "Object Detection Using ESP32 Cameras for Quality Control of Steel Components in Manufacturing Structures". *Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol. 48. P. 12741–12758. DOI:10.1007/s13369-022-07562-2
19. Alldatasheet.com. "ESP-WROOM-32 Datasheet", available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1179101/ESPRESSIF/ESP-WROOM-32.html> (last accessed 07.10.2024).
20. Sawangsri, Worapong; Prasithmett, Peerapol (2023), "Concept and development of IoT-based e-maintenance platform for demonstrated system". *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. Vol. 18. P. 1–21. DOI: 10.1007/s12008-023-01453-y
21. Quintal. "Washing circuit boards in an ultrasonic bath, ultrasonic cleaning" ["Myttya plat v ul'trazvukoviy vannii, ul'trazvukove ochyshchennya"], available at: <https://kvintal.com.ua/ultrazvukovaya-ochistka-pechatnyh-plat/> (last accessed 10.10.2024).
22. WIKA blog. "Calculation of the liquid level using hydrostatic pressure", available at: <https://blog.wika.com/products/level-products/hydrostatic-level-measurement-open-geometries-vessels-calculation-filling-height/> (last accessed 15.10.2024).
23. Online store of control and measuring devices KVP. "Ultrasonic bath Jeken (Codyson) PS-06A" "Ul'trazvukova vanna Jeken (Codyson) PS-06A"], available at: <https://starcom.com.ua/ultrazvukovaya-vanna-jeken-codyson-ps-06a/> (last accessed 17.10.2024).

24. Async Web Server for ESP8266 and ESP32. "GitHub – me-no-dev/ESPAsyncWebServer", available at: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer> (last accessed 20.10.2024).

Надійшла (Received) 14.10.24

Відомості про авторів / About the Authors

Бронніков Артем Ігорович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: artem.bronnikov@nure.ua; ORCID ID: 0000-0003-3096-7653

Коломієць Альона Ігорівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: alona.kolomiets@nure.ua; ORCID ID: 0000-0003-3096-7653

Юрченко Олег Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oleh.iurchenko@nure.ua; ORCID ID: 0009-0005-2119-3918

Bronnikov Artem – Phd (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Kolomiets Alona – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Iurchenko Oleh – Kharkiv National University of Radio Electronics, Student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ РОБОТИ ПРИЛАДОБУДІВНОГО ПРИМІЩЕННЯ

Предметом дослідження в статті є застосування технології та алгоритмів керування в системі автоматизації моніторингу роботи приладобудівного приміщення. **Мета роботи** – розроблення системи симуляції та моніторингу виробничого процесу. У статті необхідно розв'язати такі **завдання**: проаналізувати наявні системи моніторингу на виробництві; обрати основні елементи й технічні засоби для створення системи моніторингу; запропонувати схему під'єднання компонентів системи; виконати фізичний макет системи; розробити програмне забезпечення системи моніторингу приладобудівного приміщення. **Застосовані методи**: математичний і системний аналіз; моделювання та симуляція – для перевірки функціонування автоматизованої системи моніторингу роботи приладобудівного приміщення. Досягнуто таких **результатів**: проаналізовано та порівняно наявні рішення впровадження систем моніторингу; обрано апаратне забезпечення й технічні засоби для розроблення системи моніторингу; запропоновано схему під'єднання компонентів системи; виконано структурну схему системи та її макет; розроблено програмне забезпечення для керування системою моніторингу та відтворення інформації з БД. **Висновки**. Розроблено макет та програмне забезпечення системи моніторингу виробничого процесу, а саме моніторингу параметрів рівня води, температури для ультразвукової відмивки друкованих плат. Використання такого виду системи сприятиме загальному зниженню виробничих витрат під час операції відмивки друкованих плат. Розроблений модуль дає змогу проводити зміни у виробничому процесі без безпосереднього втручання людини, що уможливило швидке переналаштування під нові завдання. Розроблено програму керування системою моніторингу головного модуля керування та запропоновано принцип її роботи й зображення графічного інтерфейсу. Також, щоб візуалізувати інформацію з бази даних, було наведено та описано програмний код для створення графіка та графічний інтерфейс користувача.

Ключові слова: система моніторингу; автоматизація; виробничий процес; датчик; ультразвукова відмивка друкованої плати; *ESP-Wroom-32*; система керування рідинними потоками.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бронніков А. І., Коломієць А. І., Юрченко О. Д. Система автоматизації для моніторингу роботи приладобудівного приміщення. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.019>

Bronnikov, A., Kolomiets, A., Iurchenko, O. (2024), "An automation monitoring system for the production facility work", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.019>

S. GAVRYLENKO, O. ABDULLIN

IMPROVING THE ACCURACY OF MACHINE LEARNING MODEL FOR FRAUD TRANSACTIONS WITH COMBINED METHODS FOR TRANSACTION ANALYSIS

Subject matter: The study focuses on the methods for detection fraud transactions. **Goal:** Improve the accuracy of machine learning models for fraud transactions with combined methods for transaction analysis. **Tasks:** Investigate methods of detection fraud transactions and suggest methods that improve accuracy. **Methods:** artificial intelligence methods, machine learning. **Results:** Methods for detecting fraudulent transactions are investigated. Methods based on data classification technology are considered: XGBoost, SVC, Logistic Regression, AdaBoostClassifier, K-Nearest Neighbors, Isolation Forest and their software models are built. The dataset used is "creditcard.csv", which contains transactions made by European cardholders over two days and contains 492 fraud cases out of 284,807 transactions. The best result is obtained with the model based on gradient boosting, which allows to process unbalanced data. It is obtained that the f1-score, due to the use of the weight parameter of the minority class, is 86% for the minority class. To improve the accuracy of fraud detection, the labeled data was clustered into subclasses using the k -means method. The number of clusters equal to twelve was determined by the elbow method. This made it possible to improve the accuracy of multiclassification. F1-score ranges from 96 to 100% for different subclasses. The feature importance within each subclass is evaluated by the gradient boosting algorithm. The results of the experiment showed a different influence of features on subclass belonging, which allows for a more detailed analysis of the data to identify hidden structures in the data. **Conclusions:** The scientific novelty of the results obtained is the combined use of data classification and clustering methods to detect fraudulent transactions, which reduced the number of type II errors. Assessing the informative value of features within different types (subclasses) of fraudulent transactions allows us to evaluate which features have the greatest impact on the object's belonging to a particular subclass.

Keywords: machine learning; fraud transactions; classification; clustering; feature importance.

Introduction

Payment fraud is currently one of the most popular criminal activities aimed at unlawfully obtaining confidential information for the purpose of stealing and misappropriating other people's money. There are a variety of fraud scenarios, including: cash assistance fraud scenarios, online trading, telephone fraud, hacking of social media and messenger accounts, and the creation of fake mobile applications.

Fraud has increased during Russia's military aggression [1]. For example, under the guise of the social platform eDopomoha, the public service portal Diia, international organisations, and well-known Ukrainian brands, fraudsters offer citizens affected by the war to receive a cash payment on social media and messengers [2]. Later on, they lure out payment card details or online banking accounts and steal the funds. In addition, the scammers create fake mobile applications and place them on Google Play and the App Store, where the victim enters their payment card details. Fraudsters also hack into users' Instagram, Facebook, Telegram, Viber accounts and send disinformation,

malware, messages asking for money, spreading, etc. [3]. Increased fraud is also dangerous in the real estate sector [4].

Detecting payment fraud is a critical task for financial institutions and e-commerce and requires continuous improvement of security systems.

To train a model effectively, large amounts of high-quality data are required. This is very difficult to obtain due to privacy regulations, fragmented data sources, or incomplete records. In addition, striking a balance between accuracy and minimising false positives is a significant challenge. False positives mark legitimate transactions as fraud, leading to customer dissatisfaction. In addition, many machine learning models, especially deep learning algorithms, function as black boxes. In this case, it is difficult to understand how they make decisions, which can be problematic, especially in the financial sector. In addition, fraudsters are constantly developing new and more sophisticated tactics, which makes them difficult to identify [5]. This requires constant updating of models, as the current level of development of fraud detection tools cannot guarantee effective information protection.

Problem statement and review of scientific publications

A wide range of machine learning methods are used to detect payment fraud, based on classification, clustering, association analysis, and data anomaly detection models [6].

Classification models use supervised learning based on labelled data to train and subsequently separate transactions into fraud and legitimate ones [7]. Neural network models also help to identify nonlinear relationships between variables [8]. Decision tree models make decisions based on a sequence of checks. Ensemble classifiers improve classification accuracy [9]. The key disadvantage of such models is that if a specific case of fraud is not presented in the training data, the model may not detect it. In addition, due to insufficient detail of transaction data, real and fraud transactions overlap, which leads to a decrease in the quality of the model. Another disadvantage of such models may be their retraining, which requires regularisation of their parameters.

Models based on unsupervised learning continuously process and analyse unlabeled data to detect patterns and build models that can identify unusual behaviour [10]. However, due to the lack of detail in transaction data, real and fraud transactions overlap, which leads to a decrease in model quality.

Expert systems create a profile of normal user behaviour for further comparison with new transactions. They are aimed at tracking changes in user behaviour that may indicate fraud activities [11]. The disadvantage of such systems is the problem of determining thresholds that balance the probability of the first and second type of error.

Associative analysis algorithms are used to find transaction patterns that are common and may be associated with fraud. An example is the following factors that are taken into account in the process of fraud detection: amount, time, place, type of product, payment method, user's location, etc. [12]. The disadvantage of the algorithm is the assumption that associative rules should be searched only on the set of patterns that are often used in fraud, which leads to the exclusion of important patterns that are rarely used.

Anomaly detection involves identifying transactions that deviate from normal user behaviour (unusual amounts, timeframes, geolocation, etc.). In addition, the relationships between different transaction variables

are analysed (for example, between the type of product and the place of purchase) [13]. Such methods can have a significant level of first-order errors.

One way to solve this problem is to use a combined approach that combines different methods and allows for the detection of a wider range of fraud schemes and is more adaptable to new types of fraud. The combination of methods also helps to reduce the number of false classifications of legitimate transactions as fraud (first type errors) [14].

The aim of this paper is to improve the quality of payment fraud detection by implementing a combined approach to transaction analysis.

Developing a model for detecting fraud transactions

In this paper, the dataset used for the study is *creditcard.csv*, which contains transactions made with credit cards in September 2013 by European cardholders.

This dataset is transactions that occurred over a two-day period and contains 492 fraud cases out of 284,807 transactions. The dataset is highly unbalanced, with the positive class (fraud) accounting for 0.172% of all transactions. It contains only numeric input variables, which are the result of the PCA transformation. Due to confidentiality issues, the original names of the features and background information about the data are not available. The features $V_1, V_2, \dots, V_{28}$ are the principal components obtained by PCA; the only features not transformed by PCA are "time" and "amount". The "time" feature contains the seconds elapsed between each transaction and the first transaction in the dataset. The "amount" feature is the amount of the transaction, which can be used for training and cost consideration. The "class" function is a response variable that takes the value "1" if fraud is detected and "0" otherwise.

Preliminary analysis of the data showed no missing values and highly correlated features (over 90%). In addition, the data is unbalanced and requires balancing [15] or certain adjustments to the model parameters. After dividing the data into training and education sets, they were standardized and normalized.

In order to detect fraud transactions, the possibility of using classification models based on ensemble methods was investigated. To study their effectiveness, their software models were developed in the Colab Python environment. The models used as basic classifiers are XGBoost, SVC, Logistic Regression,

AdaBoostClassifier, K-Nearest Neighbors, and Isolation Forest. Gradient boosting algorithm (*XGBoost*) builds a model as an ensemble of decision trees. Each new tree adds information that was not taken into account by the previous trees. The Support Vector Classifier (*SVC*) builds a hyperplane that optimally divides the data into classes. Logistic Regression is a statistical method for predicting binary outcomes that calculates the probability that an object belongs to a certain class. The Adaptive Boosting algorithm is also an ensemble classifier that sequentially combines weak classifiers and combines them into a strong classifier. In this case, each new classifier is trained on data that was misclassified by previous classifiers. The misclassified objects receive more weight in subsequent iterations, and the final prediction is calculated as a weighted sum of the predictions of all weak classifiers. The K-Nearest Neighbors (*KNN*) algorithm classifies based on similarity. It assigns a new object to the class that is the most common among the k nearest neighbors of this object in the training set. The Isolation Forest algorithm is commonly used for anomaly detection. It builds isolation trees that recursively partition the data until each object is isolated. Each of these algorithms has its own advantages, which depend on the specific task and the source information. For example, the use of *XGBoost* and *AdaBoost* algorithms is effective for large datasets with complex relationships between features. *SVC* is productive when processing data with a nonlinear separation boundary. Logistic regression is easy to interpret and effective for binary classification. *KNN* does not require explicit model training, is easy to apply, but can be sensitive to noise. Isolation Forest is one of the most effective algorithms for anomaly detection.

Fig. 1 shows the results of binary classification quality for class "0" and class "1". To determine the quality of the model, we used the *f1-score*, which provides a balanced assessment of the model's performance, taking into account false positives and false negatives.

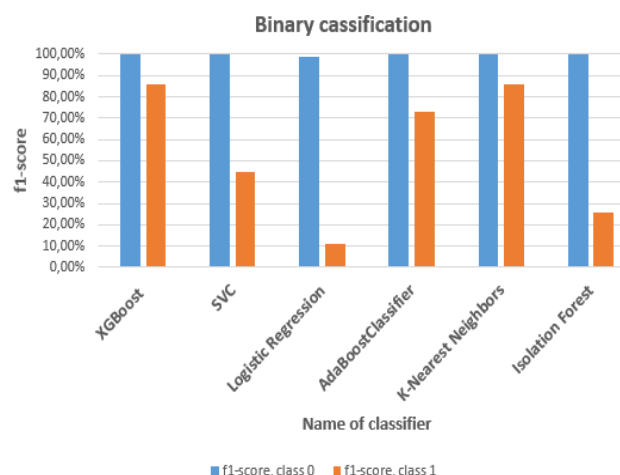


Fig. 1. Quality results of binary classification

As can be seen from fig. 1, the best results were achieved when using a model based on the gradient boosting algorithm. *XGBoost* belongs to the category of ensemble learning, in particular to the gradient boosting structure, uses decision trees as basic learning methods, and is known for its computational efficiency [16]. The model based on the gradient boosting algorithm also uses regularization methods to improve model generalization and is particularly effective in dealing with imbalanced data. For this purpose, the *scale_pos_weight*, tuning parameter is implemented to help balance the positive and negative classes by giving more weight to the minority class:

$$scale_pos_weight = \frac{Number\ of\ Positive\ Class\ Instances}{Number\ of\ Negative\ Class\ Instances}.$$

The quality assessment of the model is shown in Fig. 2. As can be seen from the report, the model is biased towards the majority class, as the quality indicators for the majority class "0" are 100%. At the same time, the *f1-score* for the minority class is sufficient due to the increased weight of the minority class and amounts to 86%.

Classification Report for XGBoost:				
	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	56864
1	0.88	0.84	0.86	98
accuracy			1.00	56962
macro avg	0.94	0.92	0.93	56962
weighted avg	1.00	1.00	1.00	56962

Fig. 2. Classification Report

To improve the quality of fraud detection, we further clustered the labeled data. This approach is non-standard, but can be promising, providing new knowledge. In some cases, clustering divides the original classes into smaller subclasses. This can be useful for a more detailed analysis of the data, as the labeled data may contain hidden structures that were not taken into account during the labeling. Clustering can help to identify these structures and gain a deeper understanding of the data. It also helps to assess which features have the greatest impact on an object's belonging to a particular cluster.

The (*k-means*) method is used for clustering. This method requires a predefined parameter k , the number of clusters. In the process of clustering by the *k-means* method, the number of clusters is most often estimated using the elbow method. It involves repeatedly cycling through the algorithm, increasing the number of clusters to be selected, and then plotting the distortion score, defined as the sum of the squares

of the intra-cluster distances to the cluster center (*WCSS*, *within-cluster sum of squares*)

$$WCSS = \sum_{C_k} \sum_{d_i \in C_k} distance(d_i, C_k)^2,$$

where C – are the cluster centroids; d – are the data values in each cluster.

To select the optimal number of clusters, we used the *KElbowVisualizer* model of the *Colab Python* library with the distortion metric, which calculates the sum of the squares of the distances from each point to its designated center. The estimate of the optimal number of clusters is shown in fig. 3. The abscissa axis corresponds to the number of clusters, the ordinate axis to the distortion score and the model training time. In this case, the optimal number of clusters is the one that corresponds to the inflection point of the graph and minimizes the model training time. As can be seen from fig. 3, the optimal number of clusters is 12. That is, the original data can be divided into 12 subclasses.

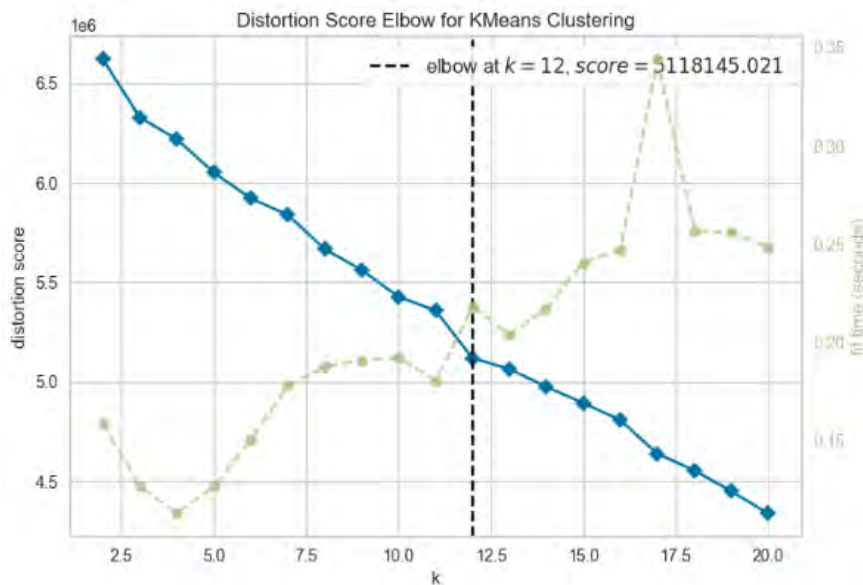


Fig. 3. Estimation of the optimal number of clusters

To build a multiclassification model for the newly labeled data, we used a model based on gradient boosting. Since the newly labeled data are also unbalanced, the *scale_pos_weight* parameter was reused in the process of model tuning. The results of multiclassification are shown in fig. 4.

The report shows that the quality of classification is excellent. The *F1-score* ranges from 96 to 100% for different subclasses.

The results are also confirmed by the ROC curve (fig. 5).

The next advantage of using gradient boosting is the ability to relatively easily obtain an information content score for each attribute. Features with high informativeness allow you to more accurately divide objects into classes and draw clearer boundaries between classes, which helps to improve classification accuracy. Selecting informative features helps to reduce data dimensionality, reduce noise, and increase model accuracy. Attribute informativeness also shows how useful or valuable each attribute was in building the

ensemble decision trees, which allows you to rank attributes and compare them with each other. In addition, attributes with low informativeness can be removed from the dataset, which is likely to speed up the speed of model training and testing.

Classification Report for XGBoost:

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	3294
1	0.99	0.99	0.99	2622
2	0.98	0.98	0.98	7607
3	0.99	0.99	0.99	11196
4	0.99	1.00	1.00	3942
5	0.98	0.98	0.98	341
6	0.98	0.99	0.98	9829
7	0.99	0.99	0.99	10417
8	0.96	0.97	0.96	721
9	0.97	0.96	0.97	621
10	1.00	1.00	1.00	6309
11	0.97	0.97	0.97	63
accuracy			0.99	56962
macro avg	0.98	0.98	0.98	56962
weighted avg	0.99	0.99	0.99	56962

Fig. 4. Results of multiclassification of source data by the XGBoost method

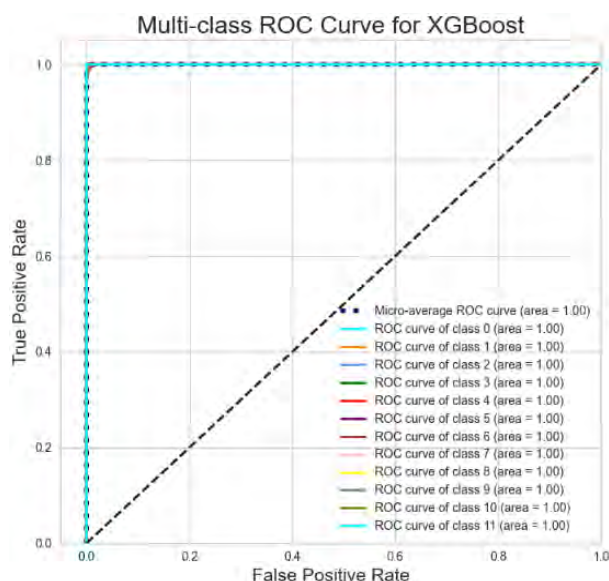


Fig. 5. ROC curve value as a result of multiclassification of the output data

The next advantage of using gradient boosting is the ability to relatively easily obtain an information content score for each attribute. Features with high informativeness allow you to more accurately divide objects into classes and draw clearer boundaries between classes, which helps to improve classification accuracy. Selecting informative features helps to reduce data dimensionality, reduce noise, and increase model accuracy. Attribute informativeness also shows how

useful or valuable each attribute was in building the ensemble decision trees, which allows you to rank attributes and compare them with each other. In addition, attributes with low informativeness can be removed from the dataset, which is likely to speed up the speed of model training and testing.

Feature information is evaluated by the *feature_importances* attribute of the XGBClassifier model. In this case, for each tree, it is estimated how much all the features contribute to reducing the degree of chaos due to the distribution of data in the nodes of the decision tree. This evaluation criterion can be, for example, information entropy:

$$H = - \sum_{i=1}^p \frac{N_i}{N} \log_2 \left(\frac{N_i}{N} \right),$$

where n is the number of classes in the original subset; N_i is the number of objects of the i -th subclass; N is the total number of objects.

Subsequently, the importance of each feature for all trees is averaged to obtain the final indicator of its informativeness for the entire model.

First, we investigated the informativeness of the features before their clustering (Fig. 6). As can be seen from Fig. 6, the following features have the greatest impact on decision making: V_{12} , V_6 , *Time*, V_{11} , V_{10} , V_{18} , V_{24} , *Amount*, V_2 , V_{22} . Thus, the informativeness of the V_{12} feature is 11.61%. That is, the value of this feature has the greatest impact on the object's belonging to the class of legitimate or fraud transactions.

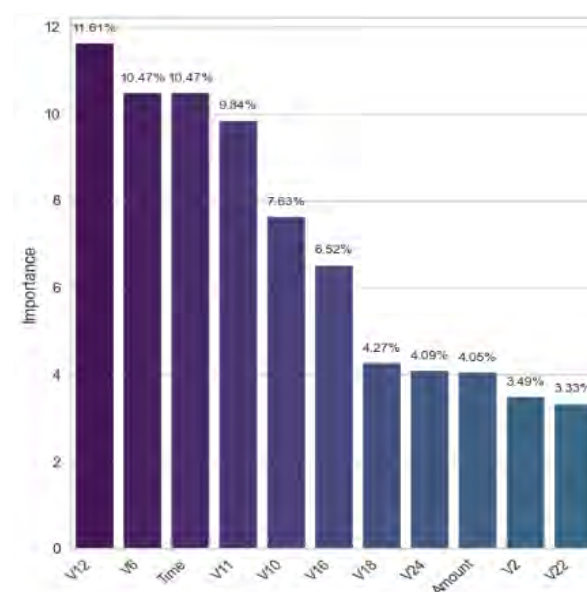


Fig. 6. Evaluation of the features informativeness before their clustering

Further research is related to the evaluation of the most informative features within each cluster (Figs. 7–9). To do this, the data is recursively divided into two classes – objects of the current cluster and other objects – and their informativeness is evaluated.

As can be seen from fig. 7, the following features are the most informative for the second cluster: V_3 , V_{14} , V_4 , V_7 , *Amount*, etc.

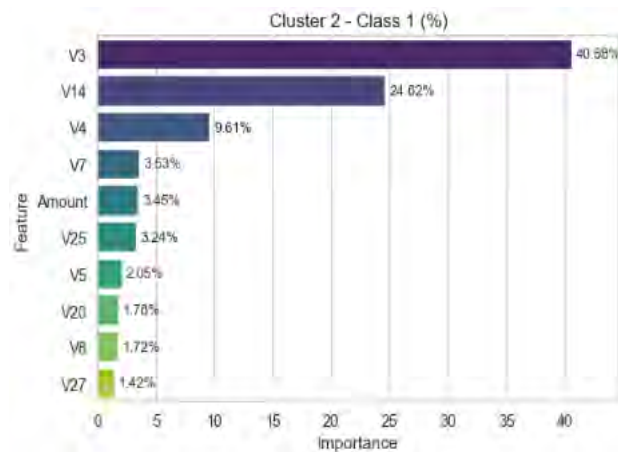


Fig. 7. Evaluation of the features informativeness for the second cluster

For the third cluster (fig. 8), the greatest influence on decision-making is provided by the features V_{10} , V_{12} , V_4 , V_{14} , *Time*, V_8 etc.

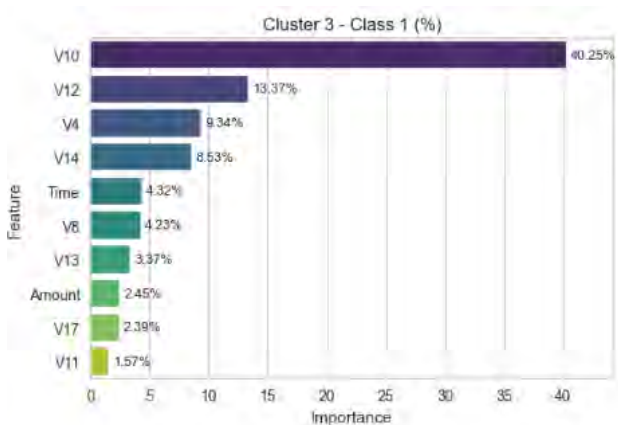


Fig. 8. Evaluation of the features informativeness for the third cluster

The analysis of fig. 9 shows that belonging to this cluster is determined by the *Amount* feature by 96.62%. That is, it can be assumed that the sequence of attributes by which objects were added to the eighth subclass allows you to access a bank account and withdraw all funds from the account at once in one transaction.

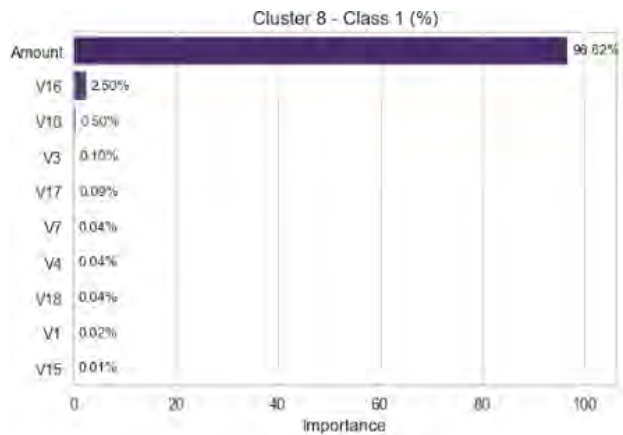


Fig. 9. Evaluation of the informativeness of features for the eighth cluster

Conclusions

The study analyzes various approaches to detecting fraud transactions. Methods based on data classification technology are considered and their software models are built in the Google Colab Python environment. The classifiers based on XGBoost, SVC, Logistic Regression, Logistic Regression, AdaBoostClassifier, K-Nearest Neighbors, Isolation Forest are investigated. The dataset used is *creditcard.csv*, which contains transactions made by European cardholders with credit cards in September 2013. This dataset is a two-day transaction and contains 492 fraud cases out of 284,807 transactions. Due to privacy concerns, the dataset is the result of a PCA transformation. There is no original feature name or background information about the data. The dataset is unbalanced. The best results are achieved by using a model based on gradient boosting. This model is particularly effective in dealing with unbalanced data because it contains a *scale_pos_weight* setting that helps to balance positive and negative classes by giving more weight to the minority class. It is determined that the *f1-score* due to the increase in the weight of the minority class is 86% for the minority class.

In order to improve the quality of fraud detection, we further cluster the labeled data. The *k-means* method was used for clustering. The number of clusters equal to 12 was determined by the elbow method. A model based on gradient boosting was used to build a multiclassification model for the newly labeled data. It was found that the quality of the model has improved significantly. The *F1-score* ranges from 96 to 100% for different subclasses.

Further, the informativeness of the features before and after their clustering was evaluated. To do this, we used the *feature importances* attribute of the *XGBClassifier* model. The data are recursively divided into two classes – objects of the current cluster and other objects – and evaluated. It was found that within each subclass, the informativeness of the features is different. For example, belonging to the eighth cluster is 96.62% determined by the "amount" feature. That is, it is possible to assume that the sequence of attributes by which objects were added to the

eighth subclass allows access to a bank account and withdraw all funds from the account simultaneously in one transaction.

Thus, the approach of combined use of data classification and clustering methods improves the quality of fraud transaction detection. The approach is useful for more detailed data analysis and identification of hidden structures that were not taken into account during the markup. It also helps to assess which features have the greatest impact on an object's belonging to a particular subclass.

References

1. Ivanna, Hordiichuk (2023), "V Ukraini zafiksovano anomalnu aktyvnist shakhraiv". available at: <https://glavcom.ua/country/criminal/v-ukrajini-zafiksovano-anomalnu-aktivnist-shakhrajiv-959941.html>
2. "U merezhi aktyvizuvalysia shakhrai, yaki proponuiut ukraintsiam «dopomohu» vid mizhnarodnykh orhanizatsii". available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3702800-u-merezi-aktivizuvalisa-sahrai-aki-proponuiut-ukraincam-dopomogu-vid-miznarodnih-organizacij.html>
3. Viktoriia, Telechuk "U Facebook diie fishynhova skhema shakhraistva: yak vberehtysia". available at: <https://rayon.in.ua/news/575310-u-facebook-die-fishingova-skhema-shakhraistva-yak-vberehtysia>
4. Voinarska, I. A. (2021), "Shakhraistvo u nerukhomosti, Ekonomika. Finansy". Pravo. № 4. P. 31–32. available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecfipr_2021_4_8
5. "Kartkovi shakhrai hrabuiut ukraintsiv sylnishe: yaki skhemy vynakhodiat i yak zakhystytysia" (2024). available at: <https://minfin.com.ua/ua/credits/articles/kartochnye-moshenniki-grabyat-ukraincev-silnee-kakie-shemy-izobretayut-i-kak-zaschititsya/>
6. Kaprian, Yu. (2023), "Vykorystannia mashynnoho navchannia dla borotby z bankivskym shakhraistvom", Biznes Inform. № 7. P. 140–145. available at: https://www.businessinform.net/_inc/kachka_pdf.php?year=2023&volume=7_0&pages=140_145&qu=%D1%88%D0%B0%D1%85%D1%80%D0%B0%D0%B
7. Sinha, A. and Mokha, S. (2017), "Classification and fraud detection in finance industry ", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 176, no. 3, P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2017915570>
8. Gavrylenko, S., Poltoratskyi, V., & Nechyporenko, A. (2024), "Intrusion detection model based on improved transformer", *Advanced Information Systems*, 8(1), P. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.12>
9. Gavrylenko, S., Chelak, V., Hornostal O. (2021), "Ensemble approach based on bagging and boosting for Identification the Computer System State", *Proceedings of the 31th International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. Sozopol, Bulgaria, P. 1–7. available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9610949>
10. Lepoivre, M. (2016), "Credit Card Fraud Detection with Unsupervised Algorithms", *Journal of Advances in Information Technology*, Vol. 7, no. 1. P. 34–38. DOI: <https://doi.org/10.12720/jait.7.1.34-38>
11. Leonard, K. (1993), "Detecting credit card fraud using expert systems", *Computers & Industrial Engineering*. 1993. Vol. 25, no. 1-4. P. 103–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(93\)90231-l](https://doi.org/10.1016/0360-8352(93)90231-l)
12. Abhishek, A. (2021), "Predictive Analytics with Machine Learning for Fraud Detection", *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, Vol. 9, no. 11. P. 1518–1520. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39046>
13. Vanarote, V. (2021), "Transaction Fraud Detection (Anomaly detection) using Machine Learning", *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, P. 361–363. DOI: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-1402>
14. Nadisha, A., Rakendu R, Surekha M. (2015), "A Hybrid Approach to Detect Credit Card Fraud", *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 5, Issue 11, P. 304–314. available at: <https://www.ijsrp.org/research-paper-1115.php?rp=P474793>
15. Gavrylenko, S., Zozulia, V., and Khatsko, N. (2023), "Methods for Improving the Quality of Classification on Imbalanced Data", *Proceedings of the IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.12>

16. Hajek, P., Abedin M., Sivarajah, U. (2022), "Fraud Detection in Mobile Payment Systems using an XGBoost-based Framework", *Inf Syst Front*, P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10346-6>

Надійшла (Received) 03.11.24

Відомості про авторів / About the Authors

Гавриленко Світлана Юрївна – доктор технічних наук, професорка, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професорка кафедри "Комп'ютерна інженерія та програмування", Харків, Україна; e-mail: gavrilenko08@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6919-0055>

Абдуллін Олексій Ренатович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", магістр, Харків, Україна; e-mail: drftg4@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8799-4253>

Gavrylenko Svitlana – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "Computer Engineering and Programming", Kharkiv, Ukraine.

Abdullin Oleksii – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master, Kharkiv, Ukraine.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПЛАТІЖНОГО ШАХРАЙСТВА ВНАСЛІДОК ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНОГО ПІДХОДУ АНАЛІЗУ ТРАНЗАКЦІЙ

Предмет дослідження – методи виявлення шахрайських транзакцій. **Метою роботи** є підвищення якості виявлення платіжного шахрайства за допомогою використання комбінованого підходу аналізу транзакцій. **Завдання:** дослідити методи виявлення шахрайських транзакцій та запропонувати підхід для підвищення якості їх виявлення. **Методи:** штучний інтелект, машинне навчання. **Досягнуті результати.** Досліджено методи виявлення шахрайських транзакцій; розглянуто методи, основані на технології класифікації даних, зокрема *XGBoost*, *SVC*, *Logistic Regression*, *AdaBoostClassifier*, *K-Nearest Neighbors*, *Isolation Forest*, та побудовано їх програмні моделі. Як вихідних дані застосовано набір *creditcard.csv*, що містить транзакції, здійснені європейськими власниками карток, які відбулися за два дні, та містить 492 випадки шахрайства з 284807 транзакцій. Найкращий результат досягнутий унаслідок використання моделі на основі градієнтного бустингу, яка дає змогу обробляти незбалансовані дані. Виявлено, що *f1-score* за допомогою застосування параметра ваги класу меншості становить 86% для міноритарного класу. З метою підвищення якості виявлення шахрайства виконано кластеризацію розмічених даних на підкласи із використанням методу *k*-середніх. Кількість кластерів, що дорівнює 12, визначено методом "ліктя". Це дало змогу підвищити якість мультикласифікації. З'ясовано, що якість моделі значно покращилась. *F1-score* становить від 96 до 100% для різних підкласів. Оцінено інформативності ознак у межах кожного підкласу алгоритмом градієнтного бустингу. Результати експерименту показали різний вплив ознак на належність до підкласу, що дає змогу більш детально проаналізувати дані з метою виявлення в них прихованих структур. **Висновки.** Наукова новизна досягнутих результатів полягає в комбінованому використанні методів класифікації та кластеризації даних для виявлення шахрайських транзакцій, що дало змогу зменшити кількість помилок другого роду. Оцінювання інформативності ознак у межах різних типів (підкласів) шахрайських транзакцій допомагає визначити, які ознаки найбільше впливають на належність об'єкта до того чи іншого підкласу.

Ключові слова: машинне навчання; шахрайські транзакції; класифікація; кластеризація; інформативність ознак.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гавриленко С. Ю., Абдулов О. Р. Підвищення якості виявлення платіжного шахрайства внаслідок використання комбінованого підходу аналізу транзакцій. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.031>

Gavrylenko, S., Abdulov, O. (2024), "Improving the quality of payment fraud detection by using a combined approach of transaction analysis", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.031>

С. ДАНШИНА, С. АНДРЕЄВ, С. ГОРЕЛИК, А. НЕЧАУСОВ, А. ПРИЙМА

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИШУКУВАНЬ У ПРОЦЕСІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Предмет дослідження – дистанційні методи інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури України. **Метою роботи** є підвищення ефективності інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури України за допомогою впровадження сучасних технологій геоінформаційних систем. **Завдання:** проаналізувати загальний стан вітчизняної залізничної інфраструктури для визначення можливих напрямів її покращення; дослідити наявну нормативно-правову базу, що регламентує інженерно-геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури в процесі їх модернізації; оцінити можливості сучасних ГІС-технологій у розв'язанні певних завдань вишукувань; формалізувати процеси польового та камерального етапів вишукувань; опрацювати розроблені функціональні моделі на практиці. **Результати.** Аналіз діяльності АТ "Українська залізниця" показує, що воно є лідером галузі, але попри високі перспективи розвитку модернізація та утримання залізничної інфраструктури вимагає значних коштів, що в умовах воєнного стану є значною проблемою. Це потребує залучення сучасних технологій та інновацій, зокрема під час проведення вишукувань об'єктів залізниці. Дослідження можливостей сучасних ГІС-технологій у процесі здійснення інженерно-геодезичних вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури та зв'язків між ними показало певні переваги та недоліки. У чинній нормативній базі з цього напрямку рекомендовано використовувати у вишукуваннях ГІС-технології, але воно не регламентовано. Розроблено DFD-діаграму, що узагальнює та формалізує процес інтеграції матеріалів, добытих під час вишукувань із застосуванням ГІС-технологій, до банку геоданих країни. Спираючись на неї, формалізовано роботи польового та камерального етапів. Експериментальним способом на прикладі проєкту дослідження залізничного полотна та прилеглої ситуації на місцевості у напрямку Ковель – Ягодин – кордон перевірено розроблені функціональні моделі. Показано, як їх використання прискорює планування подібних проєктів. **Висновки.** Опрацювання на практиці розроблених функціональних моделей підвищує ефективність виконання інженерно-геодезичних вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури. Зокрема систематизація та структуризація потоків даних, алгоритмізація діяльності під час виконання робіт польового та камерального етапів спрощують процеси планування проєктів виконання вишукувань, збільшують інформативність дослідних матеріалів з одночасним зменшенням часових витрат на проведення робіт, підвищують точність отримання геометричних і геодезичних параметрів місцевості.

Ключові слова: інформаційний процес; функціональне моделювання; потоки даних; лазерне сканування; етапи інженерно-геодезичних вишукувань; ГІС-інструменти *Leica*.

Вступ

Здатність людства використовувати науку, технології та інновації (НТІ) для протистояння кризам та їх спроможності забезпечувати добробут суспільства є очевидними, але потенціал застосування НТІ для досягнення цілей сталого розвитку, на жаль, залишається незастосованим, адже існують певні бар'єри на шляху їх прогресу, які необхідно визначати та долати. Війна в Україні також додала певних викликів і загроз у реалізації цих цілей, серед яких недостатність фінансових ресурсів, нова демографічна реальність, брак кваліфікованих кадрів і робочої сили для відродження економіки. За цих обставин лише збільшення частки використання результатів науки, нових технологій та інновацій може сприяти досягненню визначених цілей розвитку [1].

Зростання рівня інноваційності національної економіки, збільшення кількості впроваджуваних розробок і підвищення економічної віддачі від них є основою Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 р. [1]. Це потребує інтеграції результатів науки, нових технологій та інновацій до загальнонаціональних, галузевих норм і стандартів з метою досягнення синергії від їх використання для суспільства. Закон України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки", формуючи цілісну систему відповідно до Державної цільової програми прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України, визначає актуальні напрями розвитку науки, техніки та інноваційної діяльності, спрямовані на повоєнну відбудову України [2]. Серед цих напрямів виокремимо фундаментальні наукові

дослідження з найважливіших проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного та іншого потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі завдяки широкому застосуванню та впровадженню новітніх інформаційних і комунікаційних технологій. Можливим способом реалізації цього напрямку стає створення стійкої транспортної інфраструктури.

За оцінками фахівців Всесвітнього економічного форуму, підвищення ефективності транспортної інфраструктури суттєво впливає на розвиток соціально-економічної діяльності країн і стійкість сучасних громад, позначається на розміщенні та ефективності виробництва, на формуванні місцевих і національних ринків, на розв'язанні соціально-економічних завдань. Визнання собівартості продукції, що є мірою економічної діяльності та її відтворенням, змушує бізнес узгоджувати розвиток своїх підприємств із планами її розвитку [3]. Так, наприклад, вантажообіг залізничного транспорту сягає 56,1%, він у середньому виконує 20% вантажних і 4% пасажирських перевезень у загальному вантажопасажирському потоці країни, що робить його однією з провідних транспортних галузей України. Тому підвищення ефективності залізничної інфраструктури стає основною метою державних програм і проєктів розвитку, а розуміння кількості та якості її доріг і всієї інфраструктури загалом виявляється необхідним для прийняття стратегічних рішень [4]. Наявність залізниці значно збільшує сукупне економічне зростання і темпи урбанізації вздовж маршруту, сприяє модернізації промислових структур, впливає на темпи економічного розвитку. З погляду просторової структури вона суттєво підвищує доступність регіону, міцність економічних зв'язків та економічний потенціал упродовж усього маршруту, забезпечує взаємозв'язок між різними галузями економіки, підприємствами та країнами, впливає на процеси виробництва, сприяючи промисловій агломерації та переміщенню факторів виробництва між міськими й сільськими районами та гарантуючи підвезення сировини й вивезення готової продукції [5–7]. Україна в цьому сенсі не є винятком. За інформацією Держстату [4], залізничний транспорт є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни (рис. 1): станом на 2021 р. вантажообіг залізничного транспорту сягнув 180,4 млрд т км (65,7% від загального

вантажобоігу за всіма видами транспорту), пасажирообіг – 15,7 млрд пас. км (25,04% від загального пасажирообігу за всіма видами транспорту). Перевезення вантажопасажиропотоку в Україні забезпечує залізнична інфраструктура шести регіональних філій: Донецької, Львівської, Одеської, Придніпровської, Південно-Західної та Південної. Картографічні моделі розподілу вантажопасажиропотоку за філіями станом на 2021 р. наведені на рис. 2.

Важливість залізничного транспорту в системі транспортних комунікацій України посилюється й тим, що крізь територію держави пролягають основні транспортні транс'європейські коридори: Схід – Захід, Балтика – Чорне море. Українська залізниця безпосередньо межує і взаємодіє із залізницями Молдови, Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини та забезпечує роботу із 40 міжнародними залізничними переходами, а також обслуговує 18 українських морських портів Чорноморсько-Азовського басейну [8]. З 2023 р. за сприянням Європейського Союзу розпочато проєкти розвитку євроінтеграційної залізничної інфраструктури Української залізниці, спрямовані на реконструкцію старих колій і будівництво залізничних пунктів пропуску з Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією. Також пропонується інтеграція Укрзалізниці до Транс'європейської транспортної мережі TEN-T для забезпечення єдиного залізничного сполучення в межах Середземноморського залізничного коридору, який починається від південного узбережжя Іспанії та закінчиться у Львові [8, 9].

Але, за інформацією Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України, пропускна спроможність окремих ділянок і напрямків залізниць перебуває на критичній межі. Це пов'язано з низкою різних факторів (наприклад, транспортне навантаження, природні умови та чинники, геопросторове положення колій і станцій, їх технічний стан тощо), які можуть суттєво скорочувати терміни служби інфраструктури та знижувати комфортність руху поїздів [5, 6]. З метою ліквідації "вузьких місць" залізничної мережі України та інтеграції залізничної інфраструктури в транспортну мережу ЄС, а також для покращення техніко-експлуатаційних можливостей об'єктів інфраструктури необхідно їх технічно переоснастити та модернізувати [8, 9].



Рис. 1. Показники роботи транспортної галузі України станом на 2021 р. (у %): а – вантажообіг; б – пасажирообіг

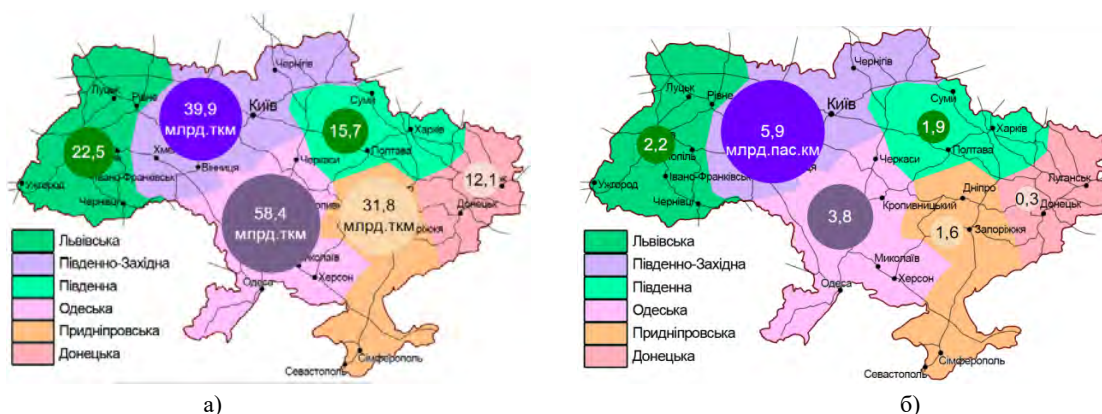


Рис. 2. Розподіл вантажопасажиропопотоку за філіями АТ "Українська залізниця" а – вантажообіг; б – пасажирообіг

Модернізація, розвиток, будівництво та утримання залізничної інфраструктури потребують значних коштів. Навіть у довоєнні часи можливості щодо реалізації інвестиційних проєктів цієї сфери в АТ "Укрзалізниця" були вкрай обмеженими [9]. З огляду на це перспективними стають підходи, ґрунтовані на використанні методів НТІ, зокрема під час геодезичних вишукувань, які ґрунтуються на високопродуктивних методах збору інформації про місцевість. Адже сучасні ГІС-технології відкривають нові перспективи для розв'язання завдань накопичення інформації про стан об'єктів залізничної інфраструктури, їх оцінювання, аналізу із фіксацією ситуації на прилеглий місцевості, з перевіркою на відповідність вимогам законодавства, дотримання будівельних норм тощо. Отримані показники надалі стають основою в розробленні проєктів модернізації та утримання об'єктів залізничної інфраструктури [3, 4].

Аналіз останніх публікацій, постановка мети дослідження

За сутністю залізнична мережа – велика, складна система, яка містить взаємопов'язану інфраструктуру

залізничних колій, мостів, віадуків і тунелів та, на відміну від інших штучних споруд, працює в умовах накопичення поступових деформацій, структурних зсувів тощо, викликаних сезонними змінами температур і опадів, погіршенням кліматичних умов, транспортним навантаженням, суттєвим збільшенням швидкості руху потягів тощо, де окремі елементи, що не працюють на повну потужність, можуть вплинути на функціональність і продуктивність усієї залізничної системи.

Передбачувані фінансові витрати на технічне обслуговування таких систем дуже високі, навіть незважаючи на соціальні витрати, викликані зниженням стандартів безпеки. У зв'язку з цим стає зрозуміло, що обслуговування залізничних мереж, а також моніторинг їх статичних і динамічних навантажень – непросте багатокритеріальне завдання, що бере до уваги аспекти належного проєктування, використання інфраструктури, її обслуговування, часову деградацію конструкційних матеріалів тощо [10–12]. Це вимагає комплексного структурного підходу до оцінювання стану об'єктів мережі та, відповідно до ст. 11 Закону України "Про залізничний транспорт", упровадження низки заходів із забезпечення безаварійної

роботи для підтримання безпеки руху поїздів та утримання в справності інженерних споруд, колій, перегонів, рухомого складу, обладнання, механізмів і пристроїв тощо (далі – об'єктів залізничної інфраструктури) [10, 13]. Зазначені заходи потребують реконструкції, переоснащення, модернізації або будівництва об'єктів залізничної інфраструктури, тобто тих процесів, здійснення яких неможливе без проведення інженерних вишукувань [13].

Метою роботи є підвищення ефективності інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури України за допомогою впровадження сучасних технологій геоінформаційних систем (ГІС).

Предмет дослідження – дистанційні методи інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури України.

Завдання дослідження:

- проаналізувати загальний стан залізничної інфраструктури України з метою визначення можливих напрямів її покращення;
- дослідити наявну нормативно-правову базу, що регламентує інженерно-геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури в процесі їх модернізації;
- оцінити можливості сучасних ГІС-технологій у розв'язанні певних завдань вишукувань;
- формалізувати процеси польового та камерального етапів вишукувань;
- опрацювати розроблені функціональні моделі на практиці.

Аналізуючи ієрархічну структуру наявної нормативно-правової бази (рис. 3), що регулює порядок інженерних вишукувань у сфері залізничної інфраструктури, зазначимо, що її основною метою є отримання топографо-геодезичних матеріалів про ситуацію та рельєф місцевості, необхідних для комплексного оцінювання природних і техногенних умов території залізничної мережі. Також законодавством передбачено обов'язкове розроблення документів геодезичного супроводу, наприклад топографічних планів, креслеників об'єктів залізничної інфраструктури, поперечних профілів залізничної колії тощо, для техніко-економічного обґрунтування проєктів із будівництва, реконструкції або модернізації цих об'єктів [13, 14].

Методи й технічні засоби виконання вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури залежать від цілей робіт і складності умов їх

виконання та зазвичай відповідають принципу "прийди та подивися" з використанням традиційних геодезичних приладів [15, 16].

1. Закон України "Про залізничний транспорт" від 04.07.1996 р. № 273/96 ВР (зі змінами).
2. Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" від 26.01.1999 р. № 353 – XIV (зі змінами).
3. Закон України "Про національну інфраструктуру геопросторових даних" від 13.04.2020 р. № 554-IX (зі змінами).

1. Постанова Кабінету Міністрів України "Впровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84" від 22.12.1999 р. № 2359 (зі змінами).
2. Постанова Кабінету Міністрів України "Порядок побудови Державної геодезичної мережі" від 07.08.2013 р. № 646 (зі змінами).
3. Постанова Кабінету Міністрів України "Порядок надходження, ведення обліку, зберігання та використання матеріалів Державного картографо-геодезичного фонду України, їх валідації" від 19.01.2024 р. № 67.

1. ДБН А.2.1-1-2008 "Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва".
2. ГНТА-2.04-04-98 "Інструкція з топографічного знімання у масштабі 1:500 – 1:5000".
3. ДБН В 2.3-19:2018 "Залізничні колії 1520 мм. Норми проєктування".
4. ДБН В 2.3-6:2009 "Мости та труби. Обстеження і випробування".

Рис. 3. Ієрархія нормативних документів, що регулюють порядок інженерних вишукувань у сфері залізничної інфраструктури

У цьому разі оцінювання стану певних об'єктів залізничної інфраструктури, наприклад, залізничного полотна, стає досить трудомістким, потребує чимало часу, надає лише точкову інформацію та багато в чому залежить від кваліфікації та особистого досвіду працівників. У деяких ситуаціях дотримання принципу повноти інформації потребує залучення спеціалізованих засобів комплексного обліку, наприклад засобів вимірювання геометрії колії. Це підвищує стандартизованість та об'єктивність процедури вишукувань, проте аналіз деяких результатів, як і раніше, вимагає чимало часу й залежить від досвіду аналітиків. Крім того, вартість придбання та експлуатації подібних засобів висока, що не сприяє їх широкому застосуванню [15]. У цьому разі ефективне здійснення вишукувальних робіт на об'єктах залізничної інфраструктури ускладнюється через великий розмір географічних територій, особливо в реалізації проєктів інтеграції Української залізниці до європейської транспортної мережі, через складність інженерно-геологічних умов країни, а також наявність обмежень на строки проведення робіт і на фінансові ресурси [15–17].

За цих обставин для підвищення ефективності та об'єктивності вишукувань дослідники та інженери-шляховики як у наукових колах, так і в практичній

діяльності наполегливо рекомендують використовувати методи дистанційного зондування, адже стрімкий розвиток технологій цього напрямку та їх поширення серед безпосередніх виконавців інженерних вишукувань пов'язують не лише зі значною фінансовою вигодою, а також з їх багатообіцяною цінністю в різних застосунках [17–19].

Тому останнім часом дистанційне зондування як потужний інструмент набуває вагомego значення серед множини наявних методів визначення характеристик об'єктів залізничної інфраструктури. Наприклад, у пасивному дистанційному зондуванні матеріали, зібрані у видимому спектрі (аерофотознімки / цифрові зображення) з різних наземних, повітряних та космічних платформ, стають найкращою інформацією для візуальної інтерпретації пошкоджень цих об'єктів за кольоровими знімками. Є значна кількість досліджень, що описують переваги використання результатів фотограмметрії за даними, отриманими з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Формуючи 3D-моделі об'єктів залізничної інфраструктури, цифрова фотограмметрія на основі інформації БПЛА має неабиякий потенціал для швидкого й автоматичного визначення характеристик пошкоджень цих об'єктів, будучи основою проєктів реконструкції, переоснащення або модернізації. За умови активного дистанційного зондування впроваджують різні методи, але найпоширенішою стає технологія лазерного сканування з використанням наземних або мобільних сканерів. Ця технологія збору показників на основі хмари точок є найважливішим джерелом інформації для створення тривимірних моделей об'єктів залізничної інфраструктури. Вона постійно та швидко розвивається разом із зменшенням розмірів і ваги лазерних сканерів [19–21].

Мабуть, тому Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" безпосередньо вказує, що інженерні вишукування необхідно здійснювати за допомогою впровадження прогресивних технологій дистанційного зондування Землі повітряними та наземними засобами [13], добуваючи інформацію про об'єкти залізничної інфраструктури з двовимірних зображень і тривимірних хмар точок. На жаль, наразі чинні правові документи, що здійснюють регулювання, контроль за якістю та дають рекомендації щодо методик проведення робіт цими засобами, відсутні [13, 14, 16].

Дослідження можливостей сучасних ГІС у завданнях модернізації об'єктів залізничної інфраструктури

У проєктах модернізації залізничної інфраструктури відповідні системи інженерних споруд і комунікацій стають об'єктами топографо-геодезичних і картографічних робіт. У цьому разі отримані матеріали містять геопросторові відомості відповідного напрямку діяльності згідно з вимогами формування та ведення банків геодезичних і топографічних показників. Необхідно зауважити, що ст. 17 Закону України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" передбачає, що як технічне й технологічне забезпечення застосовуються сучасні обчислювальні та інформаційні техніки й технічні засоби, інформаційні технології та системи створення геодезичних, топографічних і картографічних матеріалів, їх збору, ведення, контролю, накопичення, зберігання, поновлення, пошуку, перетворення, перероблення, відтворення, видачі та передачі [13]. Як найсучасніші з них розглядають дистанційне зондування Землі повітряними та наземними засобами й дистанційне зондування Землі з космосу [13, 22].

Узагальнюючи наявний досвід, зазначимо, що кожна з технологій дистанційного зондування Землі певною мірою може бути впроваджена під час проведення інженерно-геодезичних вишукувань в умовах модернізації об'єктів залізничної інфраструктури, а оброблення результатів кожної з них дає змогу актуалізувати інформацію банку геоданих. На рис. 4 наведено діаграму потоків даних (DFD-діаграму), що ілюструє, які матеріали, що стають елементом банку геоданих, отримують унаслідок використання певних ГІС-технологій у інженерно-геодезичних вишукуваннях.

Зазначимо, що на запропонований DFD-діаграмі увага зосереджена не лише на класичних і найбільш застосованих, а також на менш популярних, але перспективних технологіях здійснення інженерно-геодезичних вишукувань, які можна використовувати в модернізації об'єктів залізниці. Так, наприклад, на етапі планування інженерно-геодезичних вишукувань і визначення їх обсягів доцільно застосовувати супутникові та аерофотознімки ділянки обстеження.

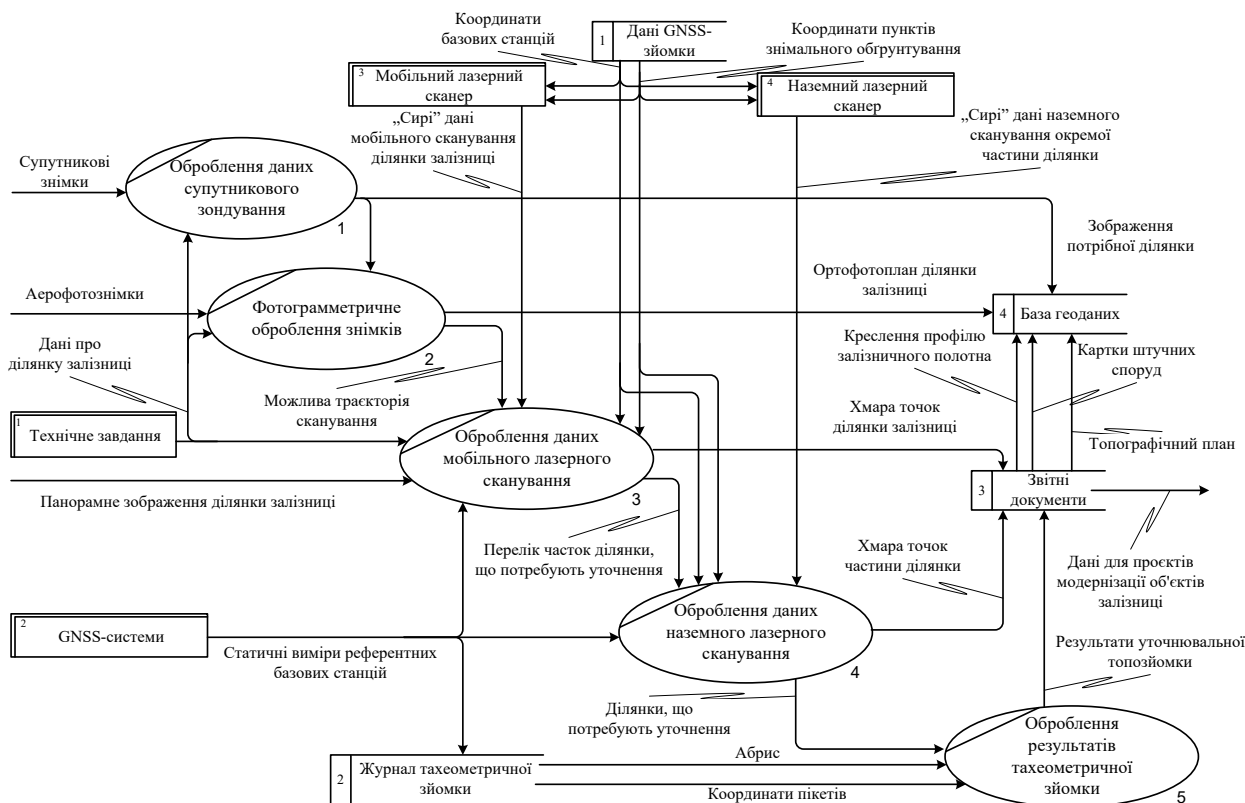


Рис. 4. DFD-діаграма формування банку геоданих із залученням сучасних ГІС-інструментів

Технології супутникового зондування та фотограмметричної аерофотозйомки є не досить поширеними інструментами в завданнях геодезичних вишукувань об'єктів залізниці, але відкривають значні можливості для отримання загальної інформації про ці об'єкти, їх стан, особливо для споруд, розташованих на великих площах або на складних ділянках місцевості [3, 16]. Не зменшуючи важливості базового, класичного й найбільш консервативного способу геодезичної зйомки – тахеометричної зйомки – на DFD-діаграмі показано її доповнювальну роль як інструменту, що застосовують у разі, коли за певних обставин є обмежений доступ до деяких ділянок вишукувань. Така сама допоміжна роль зазначена й для GNSS-зйомки. Маючи на увазі, що в інженерно-геодезичних вишукуваннях GNSS-зйомка, наприклад, у режимі RTK може використовуватися як ефективний інструмент у разі розвитку опорної геодезичної мережі або створення планово-знімального обґрунтування за відсутності в безпосередній близькості опорної мережі пунктів. Але в завданнях геодезичних вишукувань об'єктів залізниці GNSS-технології виконують більш значущу та фундаментальну роль, ніж лише як вид топографічної зйомки. Статистичні виміри базових станцій

проводять за пів години до та після проведення мобільного лазерного сканування для подальшого оброблення та коригування траєкторії руху мобільної сканувальної системи, а також для здійснення геоприв'язки отриманої хмари точок [23]. Як найпотужніший інструмент інженерно-геодезичних вишукувань, що покриває найбільші площі за умови великих масштабів зйомки, на DFD-діаграмі зазначено мобільне лазерне сканування, яке успішно застосовують під час розв'язання завдань інвентаризації та паспортизації інфраструктури залізниці, вивчення стану залізничного полотна, оцінювання його профілю, збору точної інформації та моніторингу інженерних споруд (електричного господарства, вантажного парку, службових приміщень тощо), зйомки тунелів, мостів, формування тривимірної цифрової моделі об'єктів залізниці тощо. Мобільне лазерне сканування вважають найбільш продуктивним сучасним інструментом у геодезичних вишукуваннях лінійних об'єктів, оскільки воно суттєво спрощує роботу польових бригад, надає надлишкові дані та забезпечує точність вимірів у 2–3 см [16, 21, 24]. Крім того, наземне лазерне сканування розглядають як самостійний інструмент геодезичних вишукувань, що також може бути

використаний як доповнення до мобільного лазерного сканування для отримання інформації з ділянок, що не вдалося дослідити за допомогою системи мобільного лазерного сканування.

Отже, найбільш результативним способом збирання даних про стан залізничної інфраструктури є комбінування сучасних надбань у сфері ГІС-технологій. У цьому контексті застосування інформації, добутої за допомогою різних технологій дистанційного зондування в межах підходу "об'єднання даних", може стати практичною методологією для подолання прогалів і обмежень у використанні окремих інструментів інженерно-геодезичних вишукувань, що в сукупності сприяє найповнішому оцінюванню залізничної інфраструктури для проєктів її модернізації [12, 16].

Формалізація етапів інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури

Під час модернізації об'єктів залізничної інфраструктури для отримання топографо-геодезичних матеріалів чинне законодавство передбачає поетапне проведення інженерних вишукувань [14], ефективність яких під час виконання суттєво підвищується завдяки комбінуванню сучасних надбань у сфері ГІС-технологій [16, 21]. Аналізуючи DFD-діаграму (рис. 3), надалі зосередимося на лазерному скануванні – технології, поширення якої пов'язують з технологічним проривом останнього десятиріччя, що сприяв перетворенню експериментальних установок зі сканування в прилади, які дають змогу виконувати польові геодезичні вишукування дуже швидко та детально [20, 21, 24]. Зокрема мобільне лазерне сканування більш ефективне для вимірювань лінійно-протяжних об'єктів і насамперед – транспортних шляхів, про які дає докладний (щільний) набір (хмару) тривимірних точок поверхні [21].

Згідно з ДБН А.2.1-1-2008 виокремлюють три етапи інженерно-геодезичних вишукувань [14]:

- підготовчий, на якому розробляють програму виконання вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури відповідно до технічного завдання з огляду на аналіз результатів вишукувань минулих років і рекогносциувального обстеження території;

- польовий, на якому виконують комплекс польових вимірювань із подальшим попереднім обробленням показників для оцінювання якості, повноти й точності зібраних матеріалів;

- камеральний, де остаточно обробляють інформацію, добуту на польовому етапі, розробляють для замовника звітні матеріали за вимогами технічного завдання та відповідно до чинного законодавства [13, 22] формують матеріали для передачі до державних картографічно-геодезичних фондів.

У чинному законодавстві проведення інженерно-геодезичних вишукувань із використанням лазерного сканування досі не регламентовано [13, 14, 22]. І хоча з'являються деякі спроби формалізації їх певних етапів (наприклад, у роботі [16]), основна послідовність дій визначається особистим досвідом практичного застосування сучасних ГІС-інструментів. За цих обставин, дотримуючись основних положень ДБН А.2.1-1-2008 та узагальнюючи практичний досвід, сформуємо модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань. Як методологію формалізації використаємо підходи IDEF3, що дають змогу формалізувати послідовність операцій процесу та зафіксувати його основні об'єкти.

IDEF3-модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань наведена на рис. 5. Відповідно до розробленої моделі початковим кроком польового етапу вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури стає створення планово-висотної основи місцевості згідно із затвердженою програмою вишукувань. Для цього виконують рекогносцирування з визначенням вузлових точок об'єкта на місцевості та вибором точок монтування базових станцій. Кількість базових станцій визначається метою проведення інженерно-геодезичних вишукувань та параметрами об'єкта дослідження. Наприклад, максимальна точність потрібна в проєктуванні та виконавчій зйомці, що потребує застосування декількох базових станцій у ділянці робіт [25]. Далі закладають планово-висотну основу місцевості, "опорні точки якої вздовж ділянки мобільного лазерного сканування у вигляді Х-подібних знаків маркують світловідбивною фарбою, виконують їх нівелювання.

Для досягнення результату мобільного сканування розраховують траєкторію руху, необхідну для синхронізації траєкторії сканера й результатів сканування. Зазвичай цю траєкторію будують за допомогою внутрішніх і зовнішніх сенсорів сканера (вбудованої інерційної системи, GNSS-приймача, одометра або інших датчиків), а її якість впливає на результати, отримані в подальшому системою мобільного сканування.

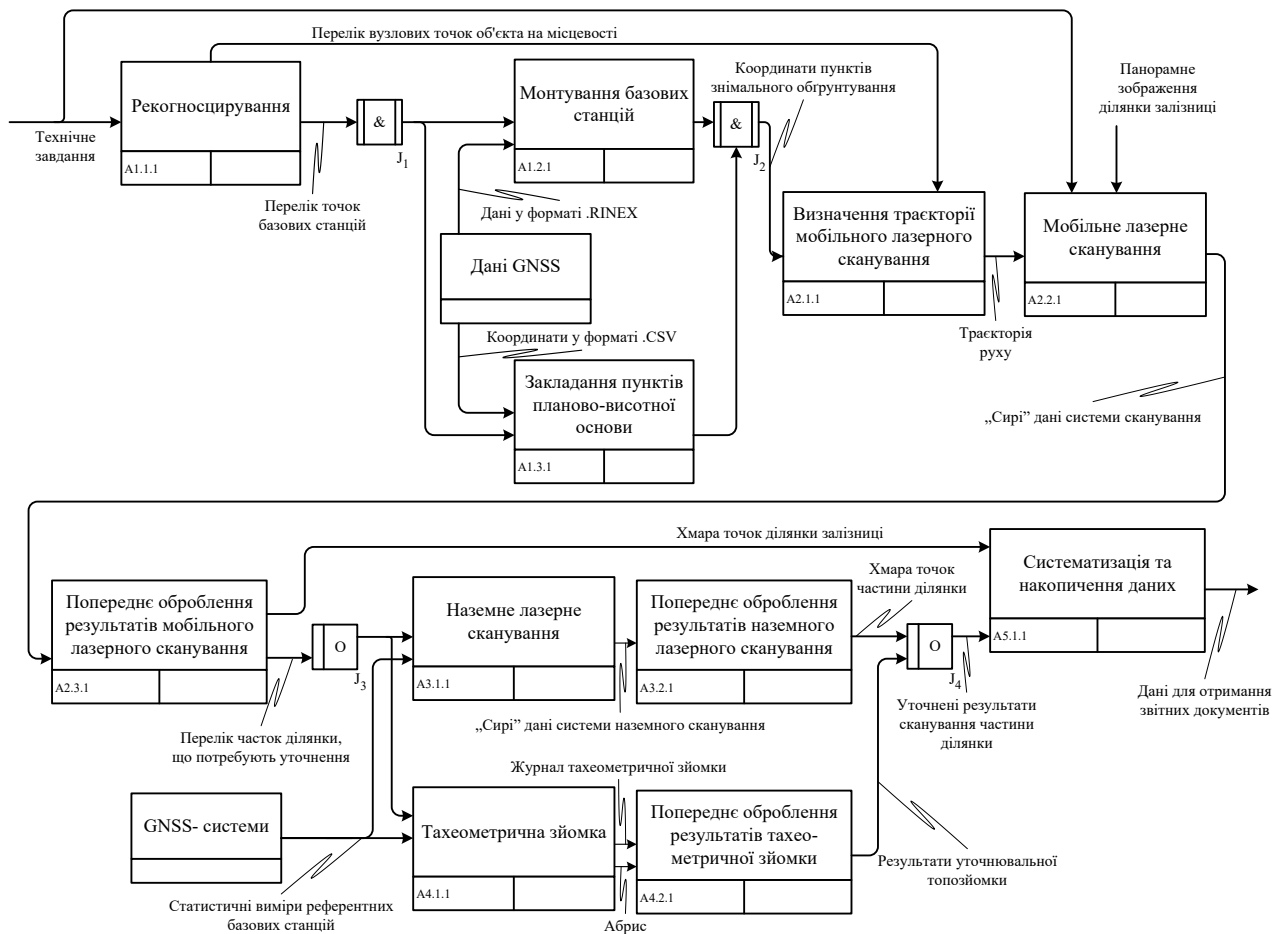


Рис. 5. IDEF3-модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань

Далі за максимально можливою траєкторією виконують мобільне лазерне сканування. Тут ефективно поєднувати лазерне сканування з панорамною зйомкою (для камерального дешифрування об'єктів) [25].

Основною проблемою лазерного сканування є аномалії хмари точок у вигляді шумів або перевідбиття променя лазерного сканера від мокрих або блискучих поверхонь [20, 23, 25]. Тому ділянки, що в повному обсязі не вдалося дослідити з використанням мобільного лазерного сканера, досліджують за допомогою наземного лазерного сканера або тахеометричної зйомки чи поєднуючи ці методи для більш точного оцінювання стану об'єкта залізничної інфраструктури.

На камеральному етапі інженерно-геодезичних вишукувань після зйомки всі результати обробляють у спеціалізованому програмному забезпеченні для отримання звітних документів, зазначених у технічному завданні. Перелік, послідовність робіт та особливості їх виконання суттєво залежать від програмного забезпечення, яке використовують

вишукувальні організації на цьому етапі [14, 16]. Після аналізу інструкцій користувачів, методичних вказівок [26–28] і загальноприйнятих алгоритмів розроблено функціональну схему камерального оброблення даних (рис. 6), отриманих на польовому етапі вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури, проведеного із застосуванням ГІС-інструментів від компанії *Leica*.

Відповідно до рис. 6 вхідною інформацією камерального етапу є результати сканування об'єктів залізничної інфраструктури, на виході формуються звітні документи для передачі замовнику. Отже, схема пояснює, як здійснюється перетворення "сирих" показників, отриманих на польовому етапі, у топографічні плани, картки штучних споруд і креслення профілю залізничного полотна. Узагальнюючи схему, зазначимо, що камеральне оброблення передбачає такі основні підпроцеси:

– обчислення координат польових базових станцій, що були встановлені та використані в процесі роботи;

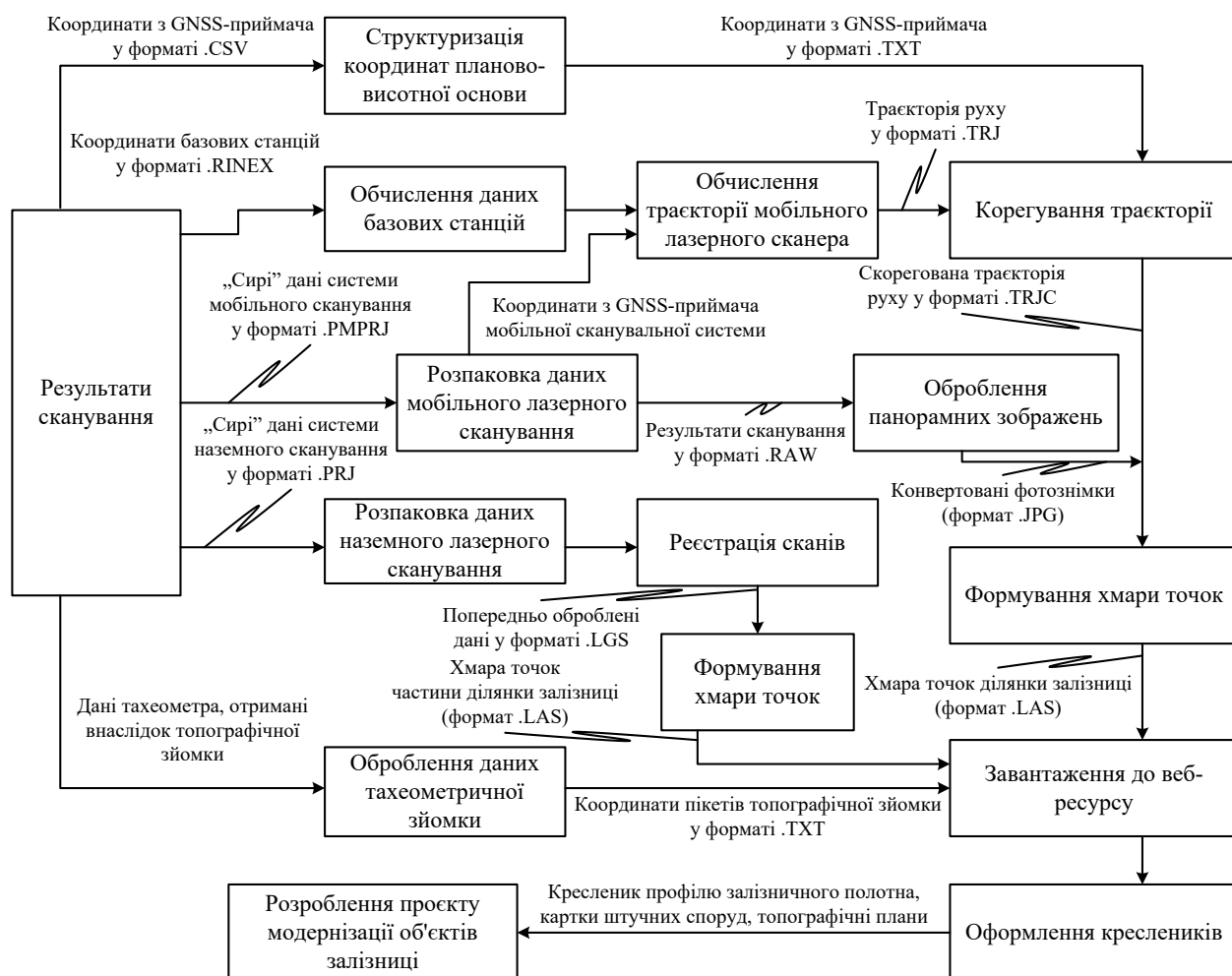


Рис. 6. Функціональна схема камерального оброблення даних

– оброблення результатів сканування та їх "зшивання" (накладання інформації з інших джерел на дані мобільного лазерного сканування) із застосуванням програмного забезпечення *Leica Cyclone* для досягнення повного і високоточного результату дослідження;

– завантаження оброблених даних разом із панорамними зображеннями до вебсервісу для зберігання та подальшого оброблення;

– оформлення креслеників на основі добутих результатів інженерно-геодезичних вишукувань із застосуванням *Autodesk AutoCAD*, що найчастіше астосовується у створенні інженерних креслень за чинними в Україні нормами та правилами.

Проект інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури на ділянці Ковель – Ягодин – кордон

Як приклад застосування в практичній діяльності запропонованих формалізованих підходів

розглянемо проєкт інженерно-геодезичних вишукувань ділянки залізниці в західній частині Волинської області: необхідно дослідити залізничне полотно та прилеглу місцевість (максимально можливої ширини) у напрямку Ковель – Ягодин – кордон. Межі цієї ділянки показано на картографічній схемі (рис. 7).

Відповідно до IDEF3-моделі (рис. 5) на початку польових робіт проведено рекогностування з метою визначення можливих проблемних ділянок на об'єкті дослідження, за результатами якого прийнято рішення закладати пункти планово-висотної основи з інтервалом 500 м уздовж усієї ділянки. Загалом закладено 214 пунктів тимчасової планово-висотної мережі, координати пунктів якої визначено за допомогою GNSS-приймача *Stonex S700A* у режимі RTK з отриманням поправок від постійно діючої мережі референтних станцій *System.net* у місцевій системі координат МСК-07.

Для коректного й точного формування траєкторії визначено координати польових базових

станцій від *System.net* у системі координат WGS-84 для подальшого опрацювання траєкторії в програмному забезпеченні *Leica Pegasus Manager* [26]. Далі за максимально можливою траєкторією проведено мобільне лазерне сканування, фрагменти результатів якого наведені на рис. 8, 9. На жаль, під час

сканування система стикалася з перешкодами, наприклад тіньовими ділянками від вантажних вагонів (рис. 9), що потребувало уточнення інформації з цих ділянок альтернативними методами – наземним лазерним скануванням або тахеометричною зйомкою.

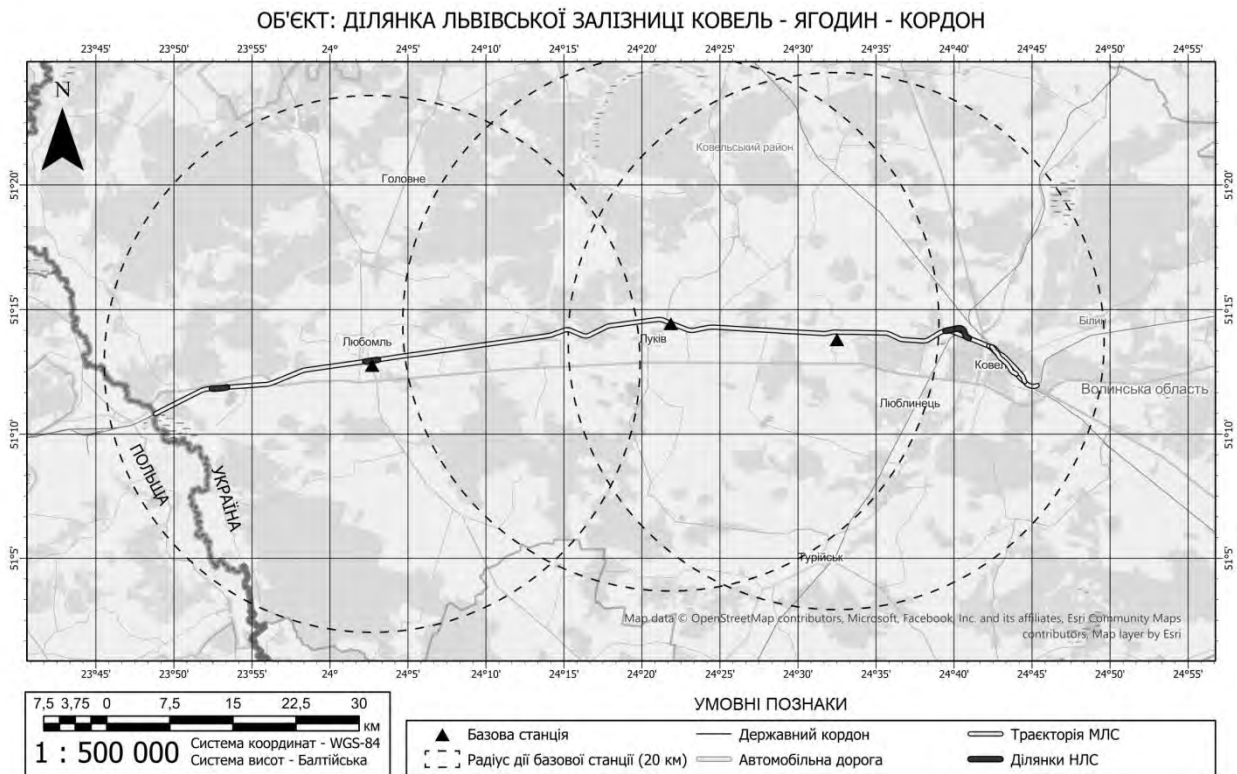


Рис. 7. Картографічна схема інженерно-геодезичних вишукувань

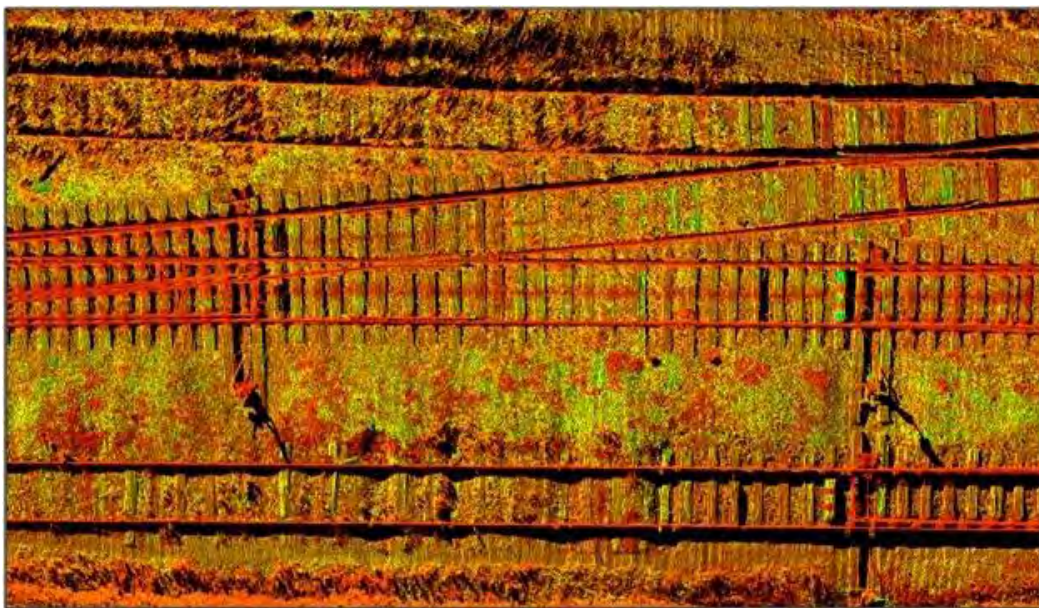


Рис. 8. Мережа стрілочних переходів, отримана від системи мобільного лазерного сканування

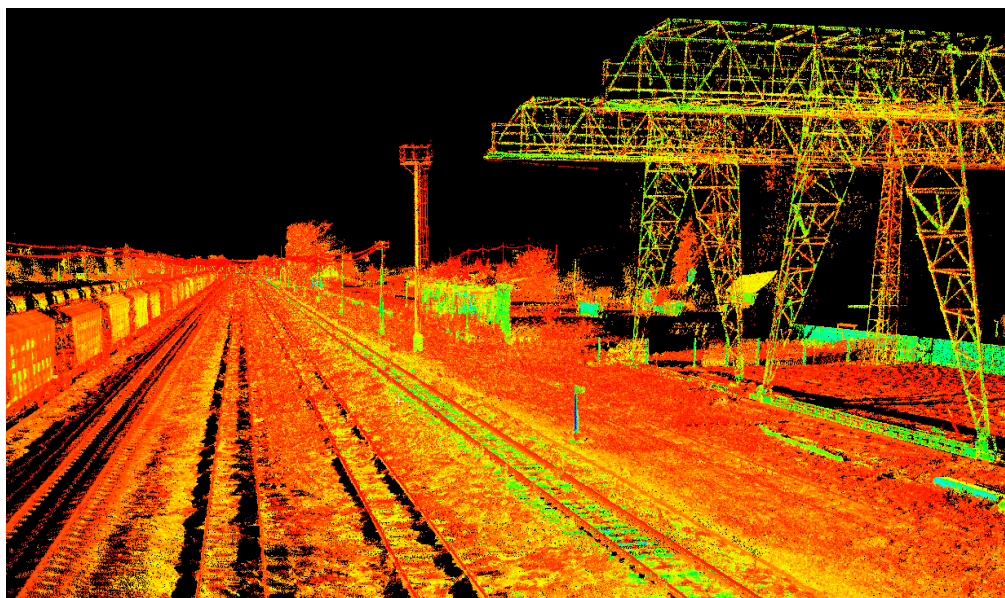


Рис. 9. Залізничний вантажний парк, отриманий від системи мобільного лазерного сканування

Після аналізу результатів роботи системи мобільного лазерного сканування можна переконатися в їх інформативності – основні елементи залізничного полотна легко ідентифікуються серед інших, а проблемні ділянки можна уточнити за панорамними

зображеннями від мобільної сканувальної системи, фотознімки якою зроблено з інтервалом через кожні 5 м (рис. 10). Усе це дає змогу безпомилково дешифрувати об'єкти залізничної інфраструктури.



а)



б)

Рис. 10. Фрагменти зображення залізничного полотна: а – панорамне зображення; б – результати лазерного сканування

Наземне лазерне сканування виконувалось пристроєм *Leica RTC 360*. Загалом було проведено сканування трьох проблемних ділянок:

- уздовж ділянки залізничної станції Ягодин, на якій були розміщені товарні вагони завдовжки 500 м;
- уздовж ділянки залізничної станції Любомль, на якій були розміщені товарні вагони завдовжки 1000 м;

– ділянки залізничної європейської колії протяжністю 2 км, проїзд нею неможливий через технічні характеристики транспортного засобу, на якому встановлено систему мобільного лазерного сканування.

У процесі проведення інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури на ділянці Ковель – Ягодин – кордон досліджено 201 штучну

споруду. У випадку надземної штучної споруди (шляхопровід, естакада) інформацію мобільного лазерного сканування можна використовувати для створення звітної документа. Для повноти даних і заповнення картки штучної споруди інженеру залишалося визначати на місці характеристики, які не вдалося встановити методом мобільного лазерного сканування.

На жаль, здебільшого штучні споруди залізничної інфраструктури розташовані в нижній частині земляного полотна, що затрудняло автоматичне отримання інформації методом мобільного лазерного сканування. У цьому разі спроби використання даних мобільного лазерного сканування з метою

оформлення звітних матеріалів щодо стану штучних споруд показали, що такі дані та панорамні зображення, отримані з мобільної сканувальної системи, є гарним доповненням у створенні карток штучних споруд (рис. 11, а), а в деяких ситуаціях і основним джерелом інформації. Наприклад, на рис. 11, б показана картка штучної споруди № 61 – залізобетонної труби на залізничній станції Любомль, яка створена за результатами фізичного обстеження і мобільного лазерного сканування. Вона містить фотознімки штучної споруди, кресленик з розмірами, коротку характеристику, історичну довідку, номер пікету (геопозиції) та опис стану елементів штучної споруди.

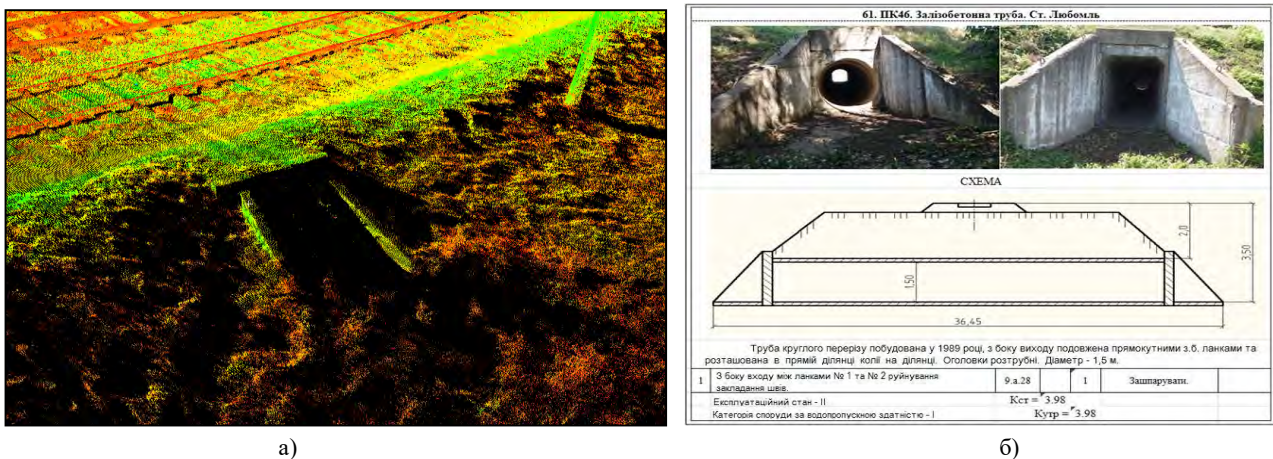


Рис. 11. Формування картки штучних споруд: а – зображення залізобетонної труби, отримане з мобільного лазерного сканера; б – фінальна картка залізобетонної труби

Отже, основною перевагою лазерного сканування є візуальний складник: інженер має доступ до тривимірного цифрового двійника штучної споруди, його реальних розмірів і фотознімка. Основним недоліком дослідження штучних споруд на основі інформації мобільного лазерного сканування є неповнота метричних показників, пов'язана з особливостями розташування штучних споруд та їх конфігурацією.

Наступним етапом є оброблення результатів наземного лазерного сканування. Під час попереднього зшивання даних на польовому планшеті в процесі їх імпорту створено певні зв'язки між матеріалами сканування, які можна оптимізувати. Аналогічно створюють нові зв'язки для підвищення точності та достовірності інформації. Зазначимо, що точність зшивки даних наземного лазерного не перевищувала 25 мм, але внаслідок накладання цієї інформації на дані, отримані від мобільного

лазерного сканера, точність підсумкових результатів суттєво підвищена, що забезпечило розбіжність не більше ніж 3 мм.

Згідно із функціональною схемою (рис. 6) оброблені результати мобільного та наземного лазерного сканування разом із панорамними зображеннями завантажено на вебсервіс *Bentley Orbit 3D Mapping Cloud*. До ресурсу хмарного зберігання завантажено 16402 панорамних фотознімків і "зшити" хмару точок від мобільного та наземного лазерного сканування завдовжки близько 90 км.

Особливе значення в разі камерального оброблення даних належить створенню звітних матеріалів за результатами інженерно-геодезичних вишукувань, що, як зазначалося раніше, суттєво спрощується завдяки застосуванню матеріалів лазерного сканування. На рис. 11 вже наведено приклад формування картки штучної споруди, розглянемо як формуються інші звітні документи.

Важливим видом робіт із дослідження об'єктів залізничної інфраструктури є вивчення стану залізничного полотна зі створенням реального поперечного профілю та порівняння його з проєктними даними [12, 15]. Поперечний профіль залізничного полотна – кресленик, що ілюструє результат поперечного перерізу вертикальною площиною, перпендикулярною до осі рейкових колій. Роботу над створенням цього кресленика здійснено із застосуванням двох систем автоматизованого проєктування – *Leica Cyclone* і *Autodesk AutoCAD*: перше використано для оброблення хмари точок (очищення від шумів, створення перерізів, зшивання станцій), а друге – для створення інженерних креслеників за чинними нормами та правилами.

На рис. 12 наведено приклад дешифрування об'єктів поперечного профілю залізничного полотна на поперечному перерізі хмари точок, у цьому разі панорамні фотознімки значно пришвидшили процес дешифрування об'єктів як на загальній хмарі точок, так і на її поперечному перерізі. Також порівняно створені кресленики на вказаних пікетах із проєктними поперечними профілями залізничного полотна, що були надані замовником. Фрагмент одного із креслеників поперечного профілю залізничного полотна зображений на рис. 13, де червоною лінією позначено проєктні дані, а чорною – фактичний поперечний профіль залізничного полотна на ділянці дослідження.

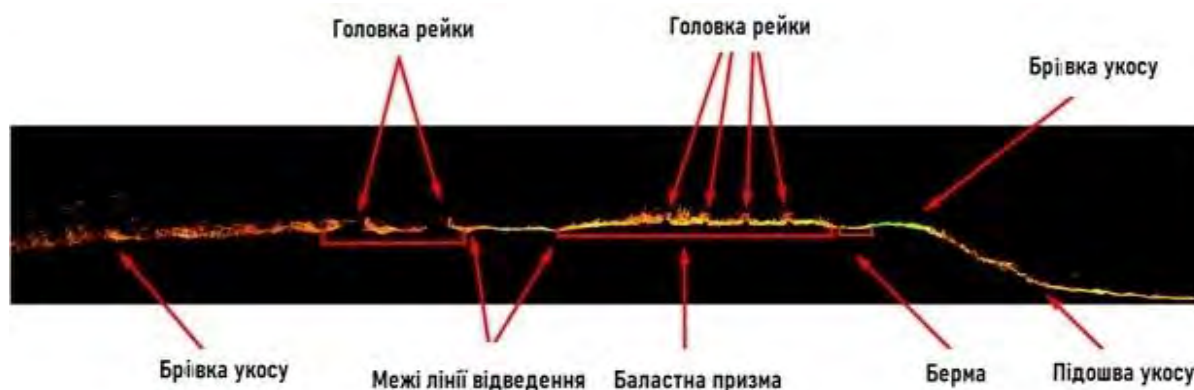


Рис. 12. Процес дешифрування елементів поперечного перерізу залізничного полотна

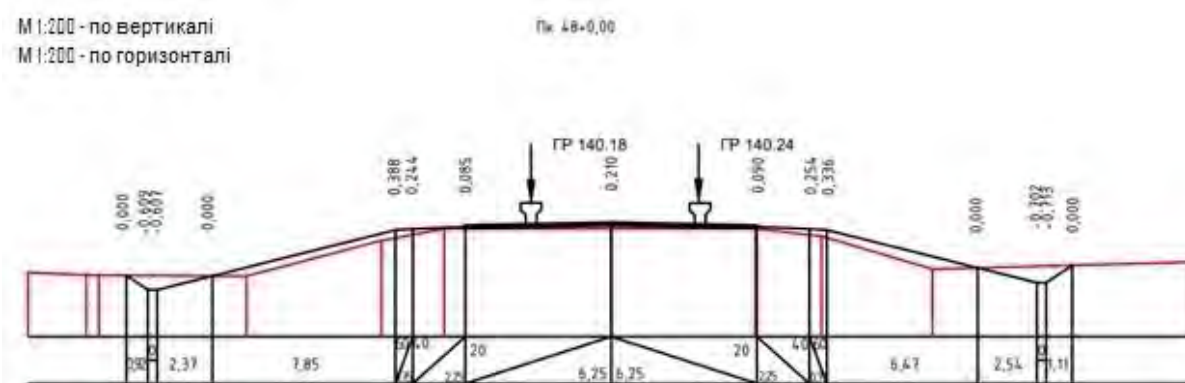


Рис. 13. Фрагмент кресленика поперечного перерізу залізничного полотна

Особливим видом робіт у геодезичних вишукуваннях є розроблення топографічних планів, що суттєво спрощується за умови використання результатів сканування [20, 21]. У цьому разі на основі хмари точок застосовують палітру інтенсивності відбиття, що з огляду на індивідуальний показник відбиття лазерного променя від певного матеріалу полегшує дешифрування об'єктів і зменшує кількість

похибок за умови векторизації даних. Векторизацію елементів залізничної інфраструктури здійснено в програмному забезпеченні *Leica Cyclone*, після чого експортовано до *Autodesk AutoCAD* для оформлення топографічного плану. Зазначимо, що для створення окремих висотних познач плану використано ручну розстановку точок висотних познач на хмарі точок. Далі результатам векторизації призначено умовні

позначки відповідно до обраного класифікатора, нанесено координатні перехрестя, контури ізоліній і розташовано кресленики на аркушах різних форматів

для подання моделі поверхні залізничного полотна у вигляді топографічного плану. Фрагмент топографічного плану проекту зображено на рис. 14.

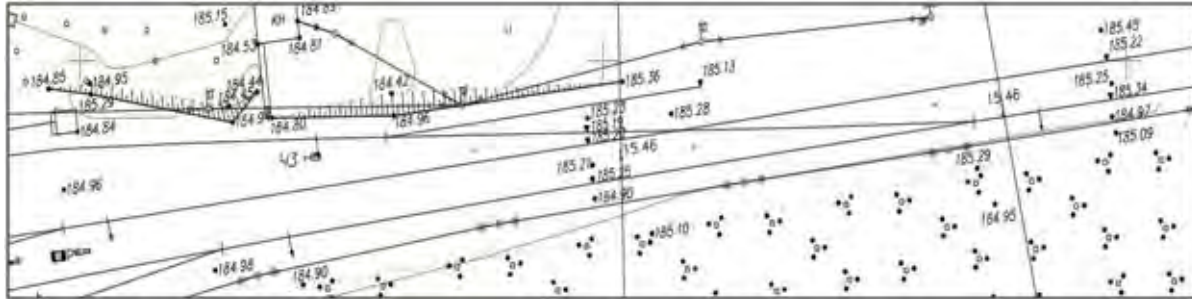


Рис. 14. Фрагмент кресленика топографічного плану

Планування розкладу проекту інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури

Особливе значення в інженерно-геодезичних вишукуваннях належить підготовчому етапу, спрямованому на формування програми вишукувань [14, 16]. Застосування розроблених функціональних моделей та схем (рис. 5, 6) прискорює планування проекту, оцінювання його тривалості, створення розкладу, виокремлення "критичних" робіт тощо, адже вони не лише визначають операції польового та камерального етапів, а, спираючись на логіку їх виконання, формалізують послідовність їх проведення.

На підготовчому етапі під час планування проекту особливу увагу приділяють оцінюванню його часових характеристик. Тут початковим кроком

є планування обсягів робіт із застосуванням моделі та схеми виконання етапів проекту.

Для отримання відповідей на запитання щодо термінів завершення проекту, календарних строків проведення окремих робіт, часового розподілу ресурсів у процесі їх виконанні тощо розробляють моделі розкладу, наприклад, за допомогою методів сіткового планування – аналізу термінів початку та завершення частин проекту, що поєднують виконання в часі різних операцій та етапів для формування прогнозу щодо загальної тривалості реалізації всього проекту [29].

Спираючись на розроблені функціональні модель та схему (рис. 5, 6), сформуємо перелік робіт. Пам'ятаючи, що плануємо польовий і камеральний етапи інженерно-геодезичних вишукувань, цей перелік передбачає (табл. 1):

Таблиця 1. Перелік робіт та зв'язків між ними

Перелік робіт проекту		Попередні роботи	Тривалість роботи, дні
Код роботи	Назва роботи		
A	Рекогносрування	–	1
B	Закладання пунктів планово-висотної основи	A	3
C	Монтування базових станцій	–	1
D	Визначення траєкторії та мобільне лазерне сканування	B, C	3
E	Попереднє оброблення результатів мобільного лазерного сканування	D	1
F	Наземне лазерне сканування	E	5
G	Тахеометрична зйомка	E	4
H	Попереднє оброблення результатів наземного лазерного сканування	F	1
I	Попереднє оброблення результатів тахеометричної зйомки	G	1
J	Систематизація накопичених даних	E, H, I	2
K	Опрацювання даних наземного лазерного сканування	J	3
L	Обробка панорамних зображень	J	1
M	Опрацювання даних тахеометричної зйомки	J	1
N	Опрацювання даних мобільного лазерного сканування	L	2
O	Поєднання даних	K, N, M	2
P	Завантаження даних до вебсервісу	O	3
Q	Векторизація даних	P	30
R	Оформлення звітних матеріалів	Q	5

– на польовому етапі: рекогностування, закладання пунктів планово-висотної основи, монтування базових станцій, визначення траєкторії, мобільне лазерне сканування, попереднє оброблення результатів мобільного лазерного сканування, наземне лазерне сканування, тахеометрична зйомка, попереднє оброблення результатів наземного лазерного сканування, попереднє оброблення результатів тахеометричної зйомки, систематизація накопичених даних;

– на камеральному етапі: опрацювання інформації наземного лазерного сканування, оброблення панорамних зображень, опрацювання даних мобільного лазерного сканування, опрацювання матеріалів тахеометричної зйомки, поєднання результатів, завантаження їх до вебсервісу, векторизація даних та оформлення звітних матеріалів.

Зважаючи на логіку виконання етапів, додатково створимо перелік попередніх робіт (що забезпечують подальші роботи, без яких їх виконання є неможливим), які, зрештою, розкривають причинно-наслідкові зв'язки виконання проєкту (табл. 1).

Індивідуально для наведеного прикладу встановлюємо тривалість робіт. Це значення може визначитися з огляду на наявний досвід здійснення подібних проєктів або експертним способом [29]. Також необхідно взяти до уваги, що реалізація певних робіт суттєво залежить від технічних засобів і можливостей. На тривалість завантаження

інформації до вебсервісу насамперед впливає швидкість інтернет-під'єднання та його надійність. Наприклад, для проєкту, що розглядається, завантаження його даних до вебсервісу обсягом близько 500 ГБ тривало повну добу (24 год), а підготовка даних до завантаження становила приблизно три робочих дні. Також зазначимо, що визначення тривалості робіт проєкту відбувається з огляду на кількість співробітників, що беруть участь у інженерно-геодезичних вишукуваннях. Наприклад, для здійснення досліджуваного проєкту виходили з припущення, що до нього можна залучити польову бригаду з п'яти інженерів-геодезистів, а також камеральний відділ з 10 картографів.

Для подальшого планування, прогнозування термінів виконання проєкту, знаходження його критичних робіт (шляху) за табл. 1 методом *Arrow Diagramming* [29] будемо сіткову модель (рис. 15). Ця модель поєднує роботи польового та камерального етапів, перелік і послідовність виконання яких подано в табл. 1, а значення тривалості робіт, встановлене для конкретного проєкту та загалом, може змінюватися.

За сітковою моделлю проєкту бачимо, що максимальний за тривалістю шлях – критичний – визначається такою послідовністю робіт:

A-B-D-E-F-H-J-L-N-O-P-Q-R,

де вказано найбільш тривалі роботи, що впливають на загальну тривалість проєкту. Для проєкту, що розглядається, ця тривалість сягає 59 днів.

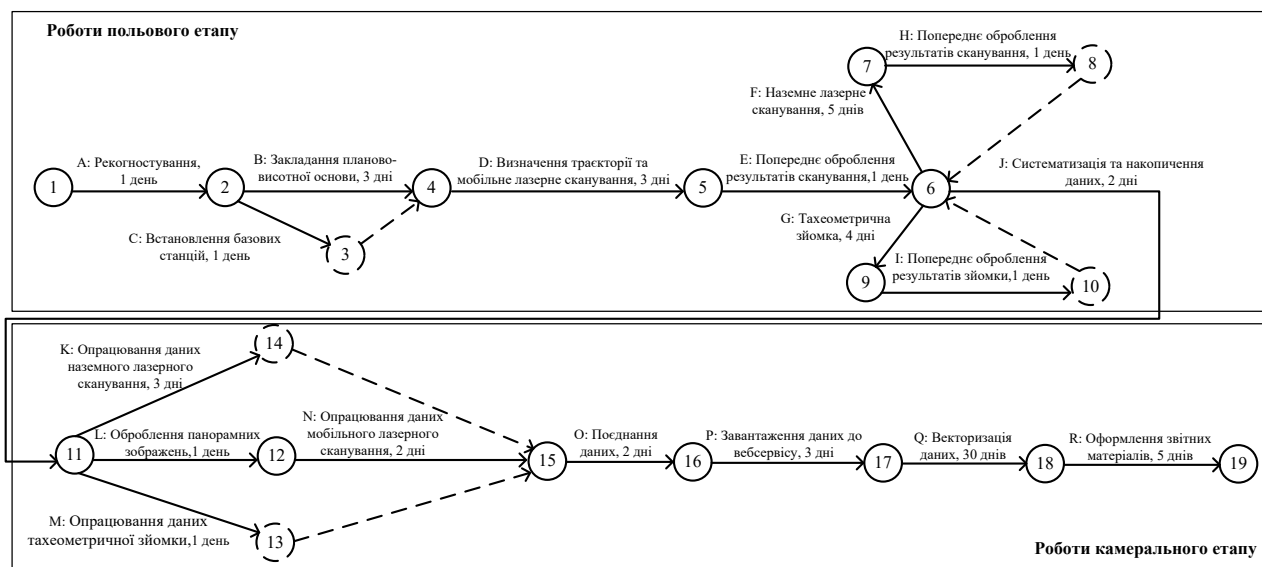


Рис. 15. Сіткова модель проєкту інженерно-геодезичних вишукувань ділянки залізниці в західній частині Волинської області, складена за розробленими функціональними моделлю та схемою

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Результати діяльності АТ "Українська залізниця" підтверджують, що це транспортне підприємство є лідером галузі, але попри високі перспективи розвитку модернізація та утримання транспортної інфраструктури вимагає значних коштів, що в умовах воєнного стану стає значною проблемою. Це спонукає до необхідності впровадження сучасних технологій та інновацій, зокрема під час проведення вишукувань об'єктів залізниці, основаних на передових методах збирання інформації про місцевість.

Результати бібліографічного пошуку підтверджують підвищення ефективності виконання геодезичних вишукувань за допомогою застосування сучасних ГІС-технологій, але аналіз чинної нормативної бази з цього напрямку показав, що їх упровадження у вишукуваннях рекомендовано, але не регламентовано. Це потребує створення документів для здійснення контролю за методиками реалізації та якістю інженерно-геодезичних вишукувань із використанням сучасних ГІС-технологій.

Розроблено DFD-діаграму, що узагальнює та формалізує процес інтеграції матеріалів, отриманих під час вишукування з упровадженням ГІС-технологій, до банку геоданих країни. Спираючись на неї, формалізовано роботи польового та камерального етапів. Зокрема з використанням нотації методології IDEF3, що формалізує інформаційні процеси за допомогою фіксації їх основних об'єктів і логічно-часових зв'язків між ними, структуровано перелік

робіт польового етапу та визначено їх логічно-часову послідовність, а також систематизовано інформаційні потоки між роботами, які виникають у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури під час отримання топографо-геодезичних матеріалів. Також створено функціональну схему камерального оброблення матеріалів інженерно-геодезичних вишукувань, яка звертає увагу на потоках даних, їх типах і джерелах отримання. З огляду на те, що перелік операцій цього етапу, їх послідовність та особливості залежать від застосованих ГІС-інструментів і відповідного програмного забезпечення, схему складено за умови використання обладнання від компанії *Leica*.

Експериментальним способом перевірено розроблені функціональні моделі на прикладі проєкту дослідження залізничного полотна та прилеглої місцевості в напрямку Ковель – Ягодин – кордон. Ефективність запропонованого підходу та розробленого науково-методичного забезпечення інформаційної підтримки проєктів модернізації об'єктів залізничної інфраструктури підтверджено за сприянням НВП "Навігаційно-геодезичний центр" (<https://ngc.com.ua/>). Зокрема систематизація та структуризація потоків даних, алгоритмізація діяльності на польовому та камеральному етапах спрощує планування проєктів виконання вишукувань, збільшує інформативність отриманих матеріалів дослідження за умови одночасного зменшення часових витрат на проведення робіт, підвищує точність геометричних і геодезичних параметрів місцевості.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер проєкту 0122U002298), а також Регіонального центру космічного моніторингу Землі "Слобожанщина".

Внесок авторів. Аналіз загального стану залізничної інфраструктури України та результатів діяльності АТ "Українська залізниця" – **А.С. Нечаусов, А.С. Прийма**; огляд та аналіз нормативно-правової бази, що регламентує геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури, та сучасних досягнень цієї сфери – **С.Ю. Даншина, С.М. Андрєєв**; розроблення концептуальних положень дослідження – **С.Ю. Даншина, С.І. Горелик**; практична апробація результатів статті – **А.С. Прийма**; аналіз результатів дослідження – **С.І. Горелик, А.С. Нечаусов**; адміністрування проєкту – **С.М. Андрєєв**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Список літератури

1. Дорожня карта використання науки, технологій та інновацій для досягнення цілей Сталого розвитку [Online]. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2024/01/03/Dorozhnya.karta.vykoryst.nauky.tekhnolohiy.ta.innovatsiy-03.01.2024-1.1.pdf> – 5.01.2024.
2. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки: Закон України від 11 липня 2001 р., № 2623-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2001. № 48. Ст. 253 (зі змінами).

3. Danshyna S., Nechausov A., Andrieiev S. Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. №. 4 (63). 2022. P. 86 – 97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
4. Транспорт України / за ред. І. Петренко. Київ: Державна служба статистики, 2022. 114 с.
5. Impact of high-speed railway construction on spatial patterns of regional economic development along the route: A case study of the Shanghai–Kunming high-speed railway / Ch. Wang [at el.]. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 87, Part B. Article 101583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101583>
6. Ren Y., Tian Yu., Xiao X. Spatial effects of transportation infrastructure on the development of urban agglomeration integration: Evidence from the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Transport Geography*. 2022. Vol. 104, Part B. Article 103431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103431>
7. Zhao J., Guo Yu. Study on the Influence of Chengdu-Chongqing High Speed Railway on the Economic Development of Neijiang City. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 199. P. 858 – 865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.107>
8. Інформація про Українські залізниці [Online]. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (дата звернення 25.12.2023).
9. Даценко В., Гречуха Д. Відбудова залізничного транспорту повоєнної України. Київ: Transparency International Ukraine, 2023. 27 с.
10. Innovative Trends in Railway Condition Monitoring / I. Bondarenko, V. Lukoševičius, R. Keršys, L. Neduzha. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 77. P. 10 – 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
11. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies / A.M. Alani [at el.]. *NDT & E International*. 2020. Vol. 115. Article 102288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>
12. Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges / F. D'Amico, V. Gagliardi, L. B. Ciampoli, F. Tosti. *NDT & E International*. 2020. Vol. 115. Article 102291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102291>
13. Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність: Закон України від 26 січня 1999 р., № 353-XIV. *Офіційний вісник України*. 1999. № 3. Ст. 91. С. 2.
14. ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва [На заміну СНиП 1.02.07-87; чинний від 2008-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 76 с.
15. Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots / G. Jing, X. Qin, H. Wang, Ch. Deng. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. Article 104242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>
16. Даншина С.Ю., Андрєєв С.М. Дистанційне зондування як ефективний інструмент проектування доріг. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 2. С. 75 – 84. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.2.08>
17. GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights / M. Rasol [at el.]. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 324. Article 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>
18. Butenko O., Horelik S., Zynyuk O. Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks. *Architecture civil engineering environment*. 2020. Vol. 13, Issue1. P. 103 – 114. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-008>
19. Road extraction in remote sensing data: A survey / Z. Chen [at el.]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 112. Article no. 102833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>
20. Eker R. Comparative use of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation. *Measurement*. 2023. Vol. 206. Article no. 112322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322>
21. An Automatic Road Surface Segmentation in Non-Urban Environments: A 3D Point Cloud Approach with Grid Structure and Shallow Neural Networks / M. Dowajy, Á. J. Somogyi, Á. Barsi, T. Lovas. *IEEE Access*. 2024. Article no. 3372431. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3372431>
22. Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Закон України від 13 квітня 2020 р., № 554-IX. *Відомості Верховної Ради*. 2020. № 37. Ст. 277.
23. GNSS, IMU, camera and LIDAR technology characterization for railway ground truth and digital map generation / O.G. Crespillo [at el.]. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1029 – 1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.532>
24. Kampczyk A., Dybel K. Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure. *Measurement*. 2021. Vol. 170. Article 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
25. Handbook of Optical and Laser Scanning [Online] / edited by G. F. Marshall, G. E. Stutz. CRC Press, 2018. 778 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315218243>
26. Leica-PegasusTwoUltimate-DataSheet-0620 [Online]. URL: https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica_pegasusbackpack_ds.pdf (дата звернення 15.02.2024).
27. Leica Cyclone Basic User Manual-01 [Online]. URL: <https://www.sdm.co.th/pdf/Cyclone%20Basic%20Tutorial> (дата звернення 15.02.2024).

28. Autodesk AutoCAD Basic User Manual-014 [Online]. URL: <https://images.autodesk.com/adsk/files/> (дата звернення 15.02.2024).
29. Application of Relationship Diagramming Method (RDM) for Resource-constrained Scheduling of Linear Construction Projects / J.U. Maheswari, V. P. Charlesraj, A. Goyal, P. Mujumdar. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 123. P. 308 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.095>

References

1. *Dorozhnia karta vykorystannia nauky, tekhnologii ta innovatsii dlia dosiahnennia tsilei Staloho rozvytku* [A roadmap for the use of science, technology and innovation to achieve the goals of Sustainable Development] available at: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2024/01/03/Dorozhnya.karta.vykoryst.nauky.tekhnolohiy.ta.innovatsiy-03.01.2024-1.1.pdf> (accessed 05.01.2024).
2. *On Priority Branches of Science and Technology Development*: Law of Ukraine of 11 July 2001, no. 2623-IX, Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 2001, no. 48, art. 253 (In Ukrainian).
3. Danshyna, S., Nechausov, A., Andrieiev, S. (2022), "Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 4 (63), P. 86 – 97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
4. *Transport Ukrainy*: [Transport of Ukraine] (2022) / edited by I. Petrenko. Kyev : State Statistics Service of Ukraine. (In Ukrainian).
5. Wang, Ch., Chen, J., Li, B., Chen, N., Wang, W. (2023), "Impact of high-speed railway construction on spatial patterns of regional economic development along the route: A case study of the Shanghai–Kunming high-speed railway", *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 87, part b, article 101583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101583>
6. Ren Y., Tian, Yu., Xiao, X. (2022), "Spatial effects of transportation infrastructure on the development of urban agglomeration integration: Evidence from the Yangtze River Economic Belt", *Journal of Transport Geography*, vol. 104, part b, article 103431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103431>
7. Zhao, J., Guo, Yu. (2022), "Study on the Influence of Chengdu-Chongqing High Speed Railway on the Economic Development of Neijiang City", *Procedia Computer Science*, Vol. 199, P. 858 – 865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.107>
8. Informatsiia pro Ukrainski zaliznytsi [Restoration of railway transport in post-war Ukraine]. available at: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zalznici.html>. (accessed 25.12.2023)
9. Datsenko, V., Hrechukha, D. (2023), *Vidbudova zaliznychnoho transportu povoiennoi Ukrainy*: [Restoration of railway transport in post-war Ukraine]. Kyev : Transparency International Ukraine, (In Ukrainian)
10. Bondarenko, I., Lukoševičius, V., Keršys, R., Neduzha, L. (2024), "Innovative Trends in Railway Condition Monitoring", *Transportation Research Procedia*, vol. 77, pp. 10 – 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
11. Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., Benedetto, A. (2020). "An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies", *NDT & E International*, Vol. 115, article 102288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>
12. D'Amico, F., Gagliardi, V., Ciampoli, L. B., Tosti F. (2020), "Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges", *NDT & E International*, vol. 115, article 102291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102291>
13. *On Topographic, Geodesic and Cartographic Activity*: Law of Ukraine of 26 January 1999, no. 353-XIV. Ofitsiynyi visnyk Ukrainy, 1999, no. 3, art. 91, 2 p. (In Ukrainian).
14. *Building Code A.2.1-1-2008. Survey. Engineering survey is in building*. Kyiv, Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2008. 76 p. (In Ukrainian).
15. Jing, G., Qin, X., Wang, H., Deng, Ch. (2022), "Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots", *Automation in Construction*, Vol. 138, article 104242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>
16. Danshina, S., Andreev, S. (2023), "Remote sensing as an effective tool for road design", *Aviation and space technology and technology*, Mo. 2, P. 75 – 84. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.2.08>
17. Rasol, M., Pais, J. C., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Fernandes, F. M., Fontul, S. (2022), "GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights", *Construction and Building Materials*, Vol. 324, article 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>
18. Butenko, O., Horelik, S., Zyniuk, O. (2020), "Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks", *Architecture civil engineering environment*, vol. 13, issue1, P. 103 – 114. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-008>

19. Chen, Z., Deng, L., Luo, Yu., Li, D., Junior, J.M., Goncalves, W.N., Nurunnabi, A.A., Li, J., Wang, Ch. (2022), "Road extraction in remote sensing data: A survey", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 112, article No. 102833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>
20. Eker, R. (2023). "Comparative use of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation", *Measurement*, Vol. 206, article No. 112322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322>
21. Dowajy, M., Somogyi, Á. J., Barsi, Á., Lovas, T. (2024), "An Automatic Road Surface Segmentation in Non-Urban Environments: A 3D Point Cloud Approach with Grid Structure and Shallow Neural Networks", *IEEE Access*, article no. 3372431. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3372431>
22. *On National Geospatial Data Infrastructure*: Law of Ukraine of 13 April 2020, no. 554-IX. Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2020, No. 37, art. 227. (In Ukrainian).
23. Crespillo, O. G., Kliman, A., Neri, A., Vennarini, A., Ruggeri, A., Marais, J., Sabina, S. (2023), "GNSS, IMU, camera and LIDAR technology characterization for railway ground truth and digital map generation", *Transportation Research Procedia*, 2023, Vol. 72, P. 1029 – 1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.532>
24. Kampczyk, A., Dybeł, K. "Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure", *Measurement*, 2021, Vol. 170, article 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
25. *Handbook of Optical and Laser Scanning* (2018) / edited by G.F. Marshall, G.E. Stutz, CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315218243>
26. *Leica-PegasusTwoUltimate-DataSheet-0620*. available at: https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica_pegasusbackpack_ds.pdf (Accessed 15 February 2024).
27. *Leica Cyclone Basic User Manual-01*. available at: <https://www.sdm.co.th/pdf/Cyclone%20Basic%20Tutorial> (Accessed 15 February 2024).
28. *Autodesk AutoCAD Basic User Manual-014*. available at: <https://images.autodesk.com/adsk/files/> (Accessed 15 February 2024).
29. Maheswari, J.U., Charlesraj, V.P., Goyal, A., Mujumdar P. (2015), "Application of Relationship Diagramming Method (RDM) for Resource-constrained Scheduling of Linear Construction Projects", *Procedia Engineering*, Vol. 123, P. 308 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.095>

Надійшла (Received) 14.10.24

Відомості про авторів / About the Authors

Даншина Світлана Юрійвна – доктор технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: s.danshyna@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4146>

Андрєєв Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: s.andreev@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2637>

Горелик Станіслав Ігорович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: s.horelik@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3640-2787>

Нечаусов Артем Сергійович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: a.nechausov@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7216-5566>

Прийма Андрій Сергійович – Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", магістр кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: priimandrei@gmail.com

Danshyna Svitlana – Doctor of Sciences (Engineering), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

Andriev Sergey – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

Horelyk Stanislav – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

Nechausov Artem – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

Pryima Andrii – National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Master at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

GEOINFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENGINEERING AND GEODETIC SURVEYS IN THE MODERNISATION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE IN UKRAINE

The **subject** of the study is remote methods of engineering and geodetic surveys in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine. The **purpose** of the study is to increase the efficiency of engineering and geodetic surveys of railway infrastructure facilities in Ukraine through the use of modern geographic information system technologies. **Objectives:** To analyse the general state of the railway infrastructure of Ukraine in order to identify possible areas for its improvement; to study the existing regulatory framework governing engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities during their modernisation; to evaluate the capabilities of modern GIS technologies in solving certain survey tasks; to formalize the processes of field and desk-based surveys; to work out the developed functional models in practice. **Results.** The results of the activities of JSC "Ukrainian Railways" show that it is the industry leader, but, despite its high development prospects, the modernisation and maintenance of railway infrastructure requires significant funds, which is a significant problem in the context of martial law. This requires the involvement of modern technologies and innovations, in particular, when conducting surveys of railway facilities. The article investigates the possibilities of modern GIS technologies in carrying out engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities, the links between them, as well as their disadvantages and advantages. The analysis of the current regulatory framework in this area has shown that the use of GIS technologies in surveys is recommended, but not regulated. A DFD diagram has been developed that summarises and formalises the process of integrating materials obtained during surveys using GIS technologies into the country's geodatabase. Based on this diagram, the work of the field and cameral workstages was formalised. The developed functional models were tested empirically, using the example of a project to study the railway track and the surrounding situation on the ground in the direction of Kovel-Yahodyn-Border. It is shown how the proposed models accelerate the planning of such projects. **Conclusions:** The practical application of the developed functional models increases the efficiency of engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities. In particular, the systematisation and structuring of data flows, algorithmisation of activities during the field and desk-based stages simplifies the planning of survey projects, increases the information content of the survey materials obtained while reducing the time spent on the work, and improves the accuracy of obtaining geometric and geodetic parameters of the area.

Keywords: information process; functional modeling; data flows; laser scanning; stages of engineering and geodetic surveys; Leica GIS tools.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Даншина С. Ю., Андреев С. М., Горелик С. І., Нечаусов А. С., Прийма А.С. Геоінформаційні технології для інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації залізничної інфраструктури України. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.039>

Danshyna, S., Andriev, S., Horelyk, S., Nechausov, A., Pryima, A. (2024), "Geoinformation technologies for engineering and geodetic surveys in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.039>

М. ЄНА

КОНТРОЛЬ МІСЬКОЇ МОБІЛЬНОСТІ БПЛА: РОЙОВИЙ ІНТЕЛЕКТ І УНИКНЕННЯ ЗІТКНЕНЬ

Предмет дослідження – інтелектуальне управління транспортними потоками в умовах міського середовища з використанням принципів ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень для забезпечення безпечної та ефективної міської мобільності. Особлива увага приділяється управлінню безпілотними транспортними засобами й дронами. **Мета роботи** – розроблення алгоритму до управління міською мобільністю, що поєднує принципи ройового інтелекту й алгоритми уникнення зіткнень для оптимізації транспортних потоків, підвищення безпеки руху та зниження кількості аварій. **Завдання:** дослідити проблеми безпеки та ефективності міського транспорту в умовах зростання урбанізації; розробити алгоритм, що поєднує ройовий інтелект і уникнення зіткнень для управління рухом безпілотних транспортних засобів; провести серію експериментів для перевірки ефективності запропонованого підходу; проаналізувати результати експериментів і визначити потенціал в покращенні міської мобільності та забезпеченні безпеки на дорогах. **Методи:** математичне моделювання транспортних потоків із застосуванням алгоритму ройового інтелекту для координації руху безпілотних транспортних засобів та уникнення зіткнень. **Результати дослідження.** Інтеграція ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень є перспективним напрямом для підвищення ефективності та безпеки міської мобільності. Застосування цього алгоритму може суттєво зменшити кількість аварій, оптимізувати транспортні потоки та сприяти створенню стійких транспортних систем у містах. **Висновки.** Запропонований алгоритм до управління міською мобільністю продемонстрував здатність покращити потоки транспорту, знизити ризик зіткнень і підвищити загальну безпеку на дорогах. Результати експериментів підтвердили ефективність застосування ройового інтелекту для координації транспортних засобів і алгоритмів уникнення зіткнень з метою запобігання аваріям.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; рій; уникнення зіткнень; міська мобільність дронів; інтегровані системи управління.

Вступ

Сучасні транспортні системи стикаються зі складними викликами, пов'язаними з міською мобільністю та безпекою на дорогах. Збільшення щільності населення та постійний розвиток інфраструктури створюють надмірне навантаження на транспортні мережі, що може призвести до затримок, заторів та дорожніх аварій. Одним із можливих розв'язків окреслених проблем є впровадження нових технологій і методів управління, що забезпечують оптимальний транспортний потік та знижують ризик аварій [1]. Розвиток інтелектуальних систем управління та впровадження інноваційних підходів, таких як ройовий інтелект і алгоритми уникнення зіткнень, можуть значно покращити ефективність і безпеку міського транспорту [2]. Робота спрямована на вивчення можливостей оптимізації транспортних потоків у міському середовищі та забезпечення безпеки на дорогах за допомогою нових технологій і методів управління [3]. Актуальність статті полягає в тому, що в ній розв'язуються нагальні проблеми, пов'язані з розвитком транспортних засобів для дронів у міських районах.

Ці виклики вирішуються через запропонований алгоритм до управління мобільністю дронів у міських умовах. Розглядаються можливості покращення реакції дронів на зміни в транспортних потоках і міському середовищі, забезпечення безпеки їх руху та оптимізації маршрутів доправлення [4].

Автор статті має на меті не лише виявити окреслені виклики, але й запропонувати практичні рішення для їх розв'язання, що робить це дослідження надзвичайно актуальним у сучасному контексті розвитку транспортних систем у містах [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд теоретичних підходів до управління мобільністю охоплює розгляд різних концепцій, моделей та методів, що використовуються для оптимізації руху транспортних засобів у міському середовищі.

Одним із ключових аспектів є трафік, його характеристики й динаміка. Це спонукає до аналізу транспортних потоків, їх розподілу в часі та просторі, а також вивчення взаємодії між різними типами транспорту [6].

Теоретичні підходи також передбачають розроблення математичних моделей та алгоритмів прогнозування й управління транспортом. Ці моделі можуть бути основані на різних методах, зокрема теорії черг, теорії графів, агентного моделювання тощо [7]. Крім того, для вивчення транспортних систем важливе використання аналізу даних, зокрема технологій Інтернету речей (IoT) та технологій великих даних для збирання, оброблення та аналізу інформації про транспортні потоки [8]. У процесі розроблення теоретичних моделей управління міською мобільністю також важливо зважати на фактори, що впливають на рішення водіїв, пасажирів та інших учасників дорожнього руху. Це можуть бути психологічні, соціальні та економічні аспекти, а також рівень комфорту, безпеки та екологічності транспортних систем [9]. Отже, огляд теоретичних підходів до управління міською мобільністю охоплює широкий спектр аспектів – від технічних до соціально-економічних – з метою розроблення ефективних і стійких транспортних систем у міському середовищі.

Основні математичні аспекти, які можна виокремити, наведені нижче.

Формула для обчислення середньої швидкості транспортного потоку, що використовується для визначення середньої швидкості руху. У контексті UTM формула допомагає розрахувати середню швидкість дронів або інших безпілотних транспортних засобів щодо пройденої відстані [9].

Для оптимізації маршрутів і прогнозування часу доправлення:

$$V = S/T, \quad (1)$$

де S – загальна довжина дороги; T – час, протягом якого транспортний потік долає відстань.

Модель черг М/М/1 для аналізу транспортних систем допомагає розрахувати середню кількість об'єктів у черзі.

Важливо для аналізу та покращення транспортних потоків у міських умовах для забезпечення ефективної мобільності [10]:

$$L_q = \frac{L^2}{1-P}, \quad (2)$$

де L_q – середня кількість об'єктів у черзі; L_s – середня кількість об'єктів у системі; p – завантаження системи.

Формула для розрахунку індексу пропускної здатності дороги: формула допомагає визначити пропускну здатність дороги [11].

Для планування інфраструктури та виявлення потенційних вузьких місць:

$$K = Q/N, \quad (3)$$

де Q – максимальна кількість транспортних засобів, яку може вмістити дорога; N – кількість смуг руху.

Рівняння Вебула для аналізу транспортних потоків використовується для обчислення середньої швидкості руху [12].

З метою визначення оптимальної швидкості руху для забезпечення безпеки та ефективності транспорту:

$$V = V_f (1 - e^{-K/K_c}), \quad (4)$$

де V – середня швидкість руху; V_f – максимальна швидкість; N – інтенсивність транспортного потоку; K_c – критична інтенсивність потоку.

Модель Гріна для аналізу транспортного потоку застосовується для визначення кількості транспортних засобів у системі [13].

Це важливо для оцінки витрат та навантаження на транспортну систему:

$$N = N_{max} \frac{K}{K + K_c}, \quad (5)$$

де N – кількість транспортних засобів; N_{max} – максимальна кількість транспортних засобів; K – інтенсивність транспортного потоку; K_c – критична інтенсивність потоку.

За допомогою математичних моделей можна впроваджувати механізми й регулятори для покращення та оптимізації руху БпЛА в межах міст і сіл.

Алгоритм інтегрованого підходу до уникнення зіткнень і ройового інтелекту

У цьому розділі описується алгоритм, що поєднує принципи ройового інтелекту й алгоритми уникнення зіткнень. Окреслений алгоритм дає змогу координувати рух дронів у міському середовищі, мінімізуючи ризики зіткнень.

Основні положення алгоритму

Крок 1. Ініціалізація RRT (*Rapidly exploring Random Tree*) – популярний алгоритм, що застосовується в робототехніці та плануванні руху [14]).

З метою генерації можливих маршрутів для роботів або інших систем із комплексними обмеженнями руху в просторах високих розмірностей поступово будується дерево із розширенням його в напрямку невивчених ділянок конфігураційного

простору та використанням випадкових зразків. Уявімо кожну точку дерева як двовимірний вектор:

$$p = (x, y), \quad (6)$$

де x і y – координати точки.

Початкові точки дерева можна обчислити так:

$$p_0 = (x_0, y_0). \quad (7)$$

Крок 2. Пошук шляху до цілі.

– Генерація випадкової точки:

$$p_{rand} = (x_{rand}, y_{rand}), \quad (8)$$

де x_{rand} , y_{rand} – випадкові значення в діапазоні $[0, "city_size"]$.

– Пошук найближчої точки всередині дерева:

$$p_{nearest} = (x_{nearest}, y_{nearest}). \quad (9)$$

– Напрямок до випадкової точки:

$$\vec{d} = \frac{p_{random} - p_{nearest}}{p_{random} - p_{nearest}}. \quad (10)$$

– Генерація нової точки:

$$p_{new} = p_{nearest} + step_{size} \times \vec{d}. \quad (11)$$

Крок 3. Побудова траєкторій до цілі.

– Пошук найближчої точки до цілі:

$$p_{goal} = (x_{goal}, y_{goal}). \quad (12)$$

– Побудова траєкторій від p_{goal} до p_{new} .

Крок 4. Уникнення зіткнень.

Обчислення напрямку уникнення. Напрямок уникнення перешкод обчислюється на основі векторів до найближчих перешкод:

$$\vec{a} = \frac{\sum_j (\vec{p}_{new} - \vec{o}_j)}{\sum_j (\vec{p}_{new} - \vec{o}_j)}, \quad (13)$$

де $\vec{o}_j$ – позиція j -ї перешкоди.

Крок 5. Оновлення швидкості.

Швидкість дрона оновлюється з огляду на вплив потенційної сили уникнення:

$$new_{velocity} = old_{velocity} + potential_{gain} \times \vec{a}. \quad (14)$$

Крок 6. Перевірка доступності точки.

Кожна p_{new} -точка перевіряється на наявність перешкод у її околі. Якщо точка розташована занадто близько до перешкоди, вона не буде долучена в маршрут.

Крок 7. Пошук індексу базової (батьківської) точки.

Ідентифікація індексу k точки в дереві, що розташована на мінімальній відстані від p_{new} .

Приклад ситуації, коли один із дронів успішно виявив лінію, і дрон із другої групи не зіткнувся з першим дроном, продемонстровано на рис. 1.

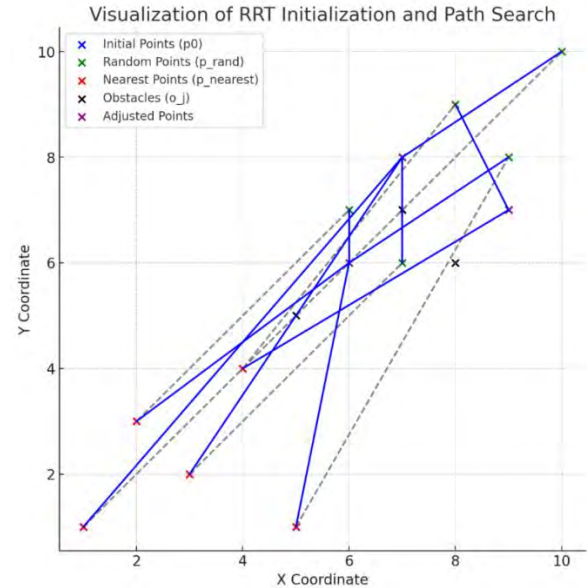


Рис. 1. Візуалізація ініціалізації RRT та пошуку шляху

Опис результуючого графіку:

– початкові точки: сині точки на графіку – це початкові координати дерева RRT. Ці точки є стартовими позиціями, з яких будується дерево;

– випадкові точки: зелені точки – випадково згенеровані координати всередині міста, які алгоритм застосовує для розширення дерева й пошуку нових шляхів;

– найближчі точки: червоні точки – це найближчі наявні точки дерева до кожної випадкової точки. Алгоритм визначає найближчу точку для побудови нового сегмента дерева;

– шляхи до випадкових точок: сірі пунктирні лінії з'єднують найближчі точки (червоні) з випадковими точками (зеленими), показуючи напрямки, у яких дерево розширюватиметься;

– перешкоди: чорні точки – це перешкоди, яких дрони мають уникати під час руху. Це можуть бути будівлі, дерева або інші об'єкти;

– кориговані траєкторії: сині лінії показують нові траєкторії, які дрони використовують для уникнення перешкод. Ці траєкторії спочатку йдуть до контрольних точок (фіолетових), щоб уникнути перешкод, а потім продовжуються до випадкових точок (зелених);

– кориговані точки: фіолетові точки – це контрольні точки, які дрони застосовують для уникнення перешкод.

Після моделювання та візуалізації процесу уникнення зіткнень у системі ройового інтелекту була створена візуалізація для демонстрації роботи алгоритму (рис. 2).

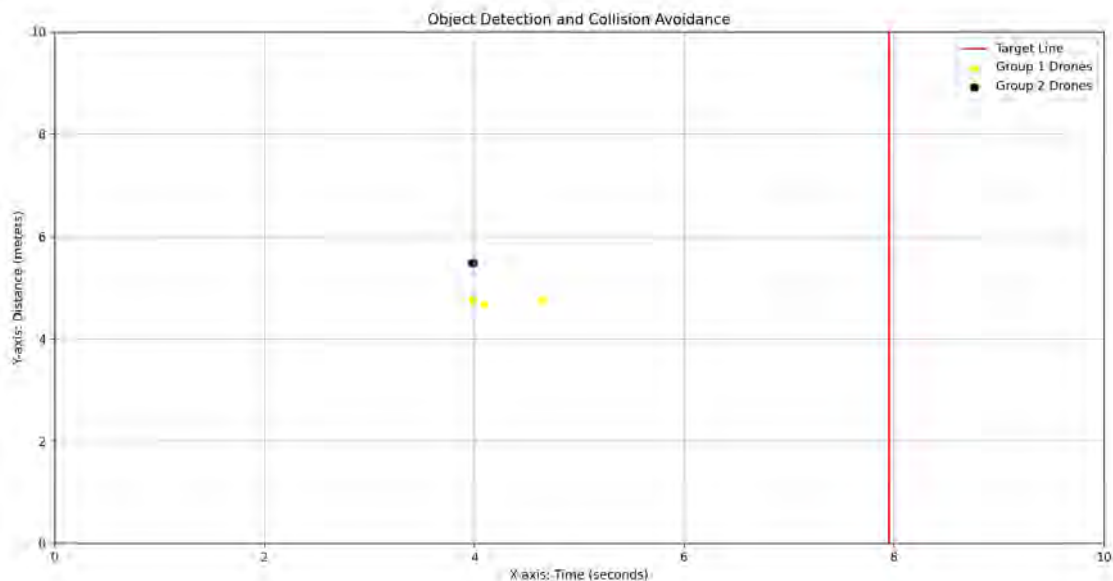


Рис. 2. Результат виявлення об'єкта одним із дронів та уникнення зіткнення

Основна мета цього графіка – показати, як дрони змінюють свої траєкторії, щоб уникнути зіткнень з іншими дронами та перешкодами.

У цьому разі було змодельовано рух двох груп дронів до цільової лінії.

На рис. 2 зображені такі елементи:

- червона лінія – цільова лінія, до якої рухаються дрони;
- жовті точки – дрони першої групи, що рухаються до цілі;
- чорні точки – дрони другої групи, які прямують за першою групою.

– **Кориговані траєкторії** показують, як дрони змінюють свої маршрути, щоб уникнути зіткнень з іншими дронами.

На графіку видно, як дрони першої групи поступово наближаються до цільової лінії, одночасно уникаючи зіткнень з іншими об'єктами або дронами другої групи.

– **Застосування в реальному світі.** Упровадження цього інтегрованого підходу є різноманітним та має значний вплив.

– **Автономні транспортні засоби.** У сфері автономного водіння ця структура дає змогу транспортним засобам навігувати в складних міських умовах, уникаючи зіткнень із пішоходами, транспортними засобами та іншими перешкодами в режимі реального часу.

– **Навігація дронів.** Дрони, обладнані цим алгоритмом, можуть автономно рухатися крізь зашарені середовища, зокрема ліси або міські райони, уникаючи зіткнень із будівлями, деревами та іншими перешкодами.

– **Робототехніка на складах.** Автоматизовані транспортні засоби (AGV) [15], що працюють на складах, можуть упроваджувати цей підхід для оптимізації планування маршрутів, забезпечуючи ефективне транспортування товарів і уникнення зіткнень із полицями, обладнанням та іншими AGV.

– **Пошуково-рятувальні місії.** У ситуаціях, що потребують пошуково-рятувальних операцій, таких як природні катастрофи або небезпечні середовища, роботизовані команди можуть використовувати цей підхід для навігації крізь уламки та перешкоди, полегшуючи вчасне виявлення та порятунок постраждалих.

– **Ройова робототехніка.** Цей підхід також можна застосувати до систем ройової робототехніки, де кілька агентів співпрацюють для досягнення спільної мети. Інтеграція механізмів уникнення зіткнень дає змогу ройовим роботам пересуватися в густонаселених середовищах без перешкод і зіткнень.

Загалом інтеграція технологій уникнення зіткнень і ройового інтелекту має значний потенціал для підвищення автономії та безпеки різних роботизованих систем у широкому спектрі застосувань [16].

Результати досліджень та їх обговорення

Ройовий інтелект – це модель, натхненна поведінкою тварин у зграї або рої. Перелічимо основні компоненти моделі ройового інтелекту.

Крок 1: положення кожного. Положення кожного індивіда i в час t може бути подане у вигляді вектора:

$$p_i(t) = (x_i(t), y_i(t)), \quad (15)$$

де $x_i(t)$, $y_i(t)$ – координати індивіда.

Крок 2: швидкість кожного. Швидкість індивіда i в час t може бути подана у вигляді вектора:

$$p_i(t) = (V_{x_i}(t), V_{y_i}(t)), \quad (16)$$

де $V_{x_i}(t)$, $V_{y_i}(t)$ – компоненти швидкості по осях x та y .

Крок 3: лідерство та взаємодія. Кожен у рої може бути притягнутий до лідера або інших індивідів на основі певних правил і функцій притягання [17].

Крок 4: оновлення положення та швидкості. Положення та швидкість кожного оновлюються відповідно до правил руху, що можуть містити прагнення до мети, уникнення перешкод і вирівнювання з навколишніми індивідами (рис. 3 і 4).

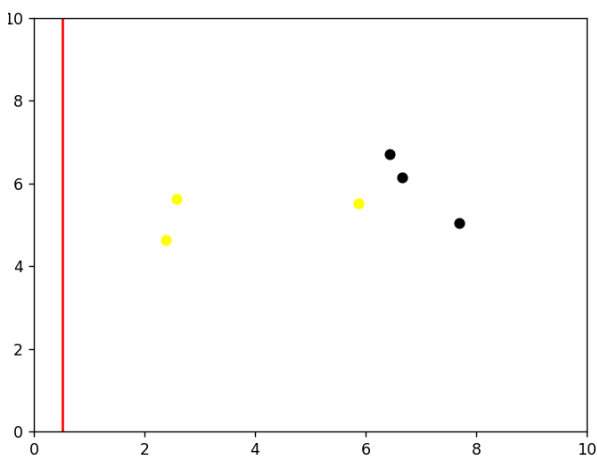


Рис. 3. Візуалізація алгоритму інтегрованого підходу до уникнення зіткнень та ройового інтелекту

Інтегрований підхід до уникнення зіткнень і ройового інтелекту, запропонований у цьому дослідженні, є надійною основою для автономної навігації в динамічних середовищах. Поєднання алгоритму швидкого дослідження випадкового дерева (RRT) з принципами ройового інтелекту показало обнадійливі результати в побудові оптимальних маршрутів з одночасним уникненням зіткнень.

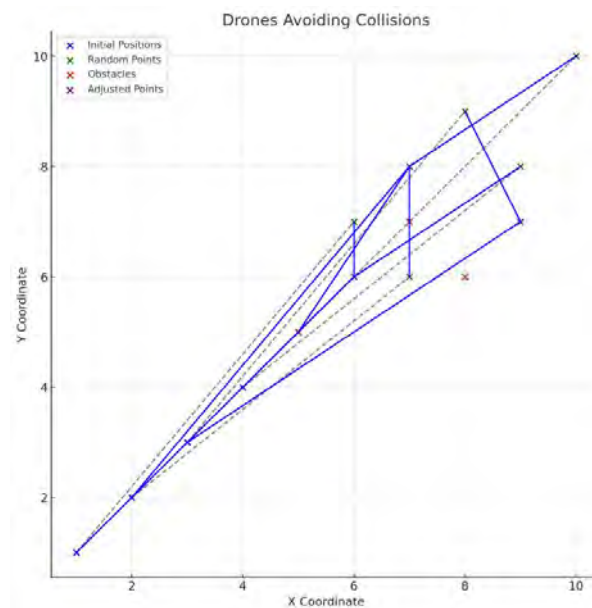


Рис. 4. Уникнення зіткнень дронами

Практичне застосування цього підходу є надзвичайно широким і охоплює різні сфери:

– **автономні транспортні засоби** можуть застосовувати цей алгоритм для безпечної навігації в міських умовах, уникаючи зіткнень із пішоходами та іншими перешкодами;

– **навігація дронів** у складних міських середовищах, зокрема густонаселених районах чи лісах, також може бути покращена внаслідок інтеграції запропонованих алгоритмів;

– **склади з робототехнікою** – автоматизовані транспортні засоби здатні оптимізувати свої маршрути для ефективного транспортування товарів, уникаючи перешкод;

– **пошуково-рятувальні місії** можуть мати значні переваги завдяки цьому підходу, оскільки дрони або автономні транспортні засоби здатні швидко та безпечно пересуватися в умовах надзвичайних ситуацій, таких як природні катастрофи;

– **системи ройової робототехніки** можуть використовувати цей підхід для синхронізації руху багатьох агентів без зіткнень, особливо в густонаселених середовищах.

Візуалізація на рис. 3 і 4 демонструє, як дрони змінюють свої траєкторії для уникнення перешкод і досягають кінцевих точок без зіткнень. Це підтверджує ефективність інтеграції ройового інтелекту та алгоритмів уникнення зіткнень у реальних умовах.

Отже, результати дослідження доводять, що запропонований підхід значно підвищує ефективність

і безпеку міської мобільності для безпілотних транспортних засобів і дронів. Інтеграція зазначених технологій може суттєво зменшити кількість аварій та оптимізувати транспортні потоки в міському середовищі. Це сприятиме створенню більш стійких і безпечних систем управління міською мобільністю.

Висновки

Синтез теоретичних підходів до управління міською мобільністю наголошує на багатовимірній природі оптимізації руху транспортних засобів у міському середовищі. Заглиблюючись у різні концептуальні межі, математичні моделі та алгоритмічні методології, дослідники можуть добути глибокі інсайти, необхідні для розвитку ефективних і стійких транспортних систем. Основою цього завдання є глибоке розуміння динаміки трафіку, що охоплює просторово-часовий розподіл транспортних потоків і складні взаємодії між різними видами транспорту.

Математичні формулювання – від фундаментальних рівнянь, що керують середньою швидкістю, до складних моделей черг, зокрема M/M/1, – пропонують кількісні підходи до аналізу та оптимізації транспортних явищ. Особливе значення серед цих формулювань мають рівняння, що визначають індекси пропускну здатності доріг і характеристики транспортних потоків, які є ключовими для планування інфраструктури та виявлення потенційних вузьких місць на міських магістралях.

Крім того, інтеграція новітніх технологій, зокрема Інтернету речей (IoT) та аналітики великих даних, доповнює традиційні моделі, надаючи безпрецедентний доступ до даних трафіку в реальному часі. Використовуючи ці технологічні досягнення, дослідники можуть добути практичні інсайти щодо поведінки транспортних потоків. Це сприятиме прийняттю більш обґрунтованих рішень у сфері управління міською мобільністю. Водночас інноваційні алгоритмічні структури, такі як схеми уникнення

зіткнень, насичені принципами ройового інтелекту, знаменують зрушення в плануванні траєкторій для автономних транспортних засобів.

Проведене дослідження демонструє важливість інтеграції сучасних підходів до управління міською мобільністю, що беруть до уваги як традиційні методи моделювання транспортних потоків, так і інноваційні алгоритми, що ґрунтуються на ройовому інтелекті та уникненні зіткнень. Поєднання концептуальних і математичних основ дає змогу розробляти комплексні рішення для оптимізації руху в умовах зростання урбанізації.

Алгоритм, описаний у цьому дослідженні, оснований на принципах алгоритму швидкого дослідження випадкових дерев (RRT) і відтворює передовий підхід, що систематично вивчає можливі шляхи в умовах складних міських середовищ. Інтегруючи механізми уникнення зіткнень і адаптивні налаштування швидкості на основі можливих вигравів, ця структура втілює комплексний підхід до забезпечення як безпеки, так і ефективності в міських транспортних системах.

Результати цього дослідження доводять, що поєднання теоретичних моделей і сучасних алгоритмічних рішень є ефективним підходом до розвитку безпечної та стійкої міської мобільності. Запропонований алгоритм для управління міською мобільністю з використанням ройового інтелекту показав високий потенціал для покращення безпеки та ефективності транспортних потоків, що має значні перспективи для подальшого впровадження в міські транспортні системи.

Отже, поєднання теоретичних моделей та алгоритмічних інновацій, проаналізованих у цій роботі, формує цілісне розуміння управління міською мобільністю. Гармонізуючи технічну майстерність із соціально-економічними імперативами, майбутні зусилля в цій сфері мають потенціал для відкриття нової ери інтелектуальних, стійких і надійних міських транспортних систем.

Список літератури

1. Na S., Niu H., Lennox B., Arvin F. Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(3), P. 2511-2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346
2. Pawełczyk M. Ł., Wojtyra M. Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection. *IEEE Access*, 2020, 8, P. 174394-174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
3. Sytsma J., Thompson D., Sicoli J. Drone Ultrasonic Detection. Australian International Aerospace Congress, 2023. URL: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (дата звернення 11.11.2024).

4. Petersen K. Tackling air pollution with autonomous drones. MIT School of Engineering, 2021. URL: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (дата звернення 11.11.2024)
5. Chu J. New 'traffic cop' algorithm helps a drone swarm stay on task. MIT News Office, 2023. URL: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (дата звернення 11.11.2024)
6. Enwerem C., Baras J.S. Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
7. Xu Z., Yan T., Yang S.X., Gadsden S.A. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023. DOI: 10.1109/TII.2023.3272666
8. Ye Y., Hu S., Zhu X., Sun Z. An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation. *Machines*, 2024, 12(1), 32 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12010032>
9. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2023. DOI:10.48550/arXiv.2304.00225
10. Zhang J., et al. Perdix: A Swarm of Swarming UAVs. *Journal of Field Robotics*, 2019, Vol. 36(6), P. 1240–1255.
11. Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter. 2023. 19 p. URL: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf>
12. Sytsma J., Thompson D., Sicoli J. Drone Ultrasonic Detection. Australian International Aerospace Congress, 2023. P. 221–225. URL: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002>.
13. Kosanam B., Kukkadapu A. Swarm Intelligence Based Traffic Control System. *IRA-International Journal of Technology & Engineering*, 2017. P. 46-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.21013/jte.v7.n2.p5>
14. Tahir A. Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles. Doctoral Dissertation. University of Turku, Turku, Finland. 2023. 449 p. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>
15. Pathak R., Barzin R., Bora G. C. Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*. 2018. Vol. 1(1). P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
16. Ali Z. A. Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents. InTechOpen. 2024. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
17. Gielis J., Shankar A., Prorok A. A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems. *Current Robot Reports*. 2022. Vol. 3(3). P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9

References

1. Na, S., Niu, H., Lennox, B. and Arvin, F. (2022), "Bio-Inspired Collision Avoidance in Swarm Systems via Deep Reinforcement Learning," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, No. 3, P. 2511-2526. DOI: 10.1109/TVT.2022.3145346.
2. Pawelczyk, M. Ł., Wojtyra, M. (2020), "Real World Object Detection Dataset for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicle Detection," in *IEEE Access*, Vol. 8, P. 174394-174409. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026192
3. Sytsma, J., Thompson, D., and Sicoli, J. (2023), "Drone Ultrasonic Detection", Australian International Aerospace Congress. available online: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002> (last accessed 11 November 2024).
4. Petersen, K. (2021), "Tackling air pollution with autonomous drones," *MIT School of Engineering*. available online: <https://news.mit.edu/2021/tackling-air-pollution-with-autonomous-drones-0624> (last accessed 11 November 2024).
5. Chu, J. (2023), "New 'traffic cop' algorithm helps a drone swarm stay on task," MIT News Office. available online: <https://news.mit.edu/2023/new-traffic-cop-algorithm-drone-swarm-wireless-0313> (last accessed 11 November 2024).
6. Enwerem, C. and Baras, J.S. (2023), "Consensus-Based Leader-Follower Formation Tracking for Control-Affine Nonlinear Multiagent Systems," available online: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09156>
7. Xu, Z., Yan, T., Yang, S.X., and Gadsden, S.A. (2023), "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. DOI: 10.1109/TII.2023.3272666
8. Ye, Y., Hu, S., Zhu, X., and Sun, Z. (2024), "An Improved Super-Twisting Sliding Mode Composite Control for Quadcopter UAV Formation", *Machines*, 12(1), 32 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12010032>
9. Sarhadi, P., et al. (2023), "Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. DOI: 10.48550/arXiv.2304.00225
10. Zhang, J., et al. (2019), "Perdix: A Swarm of Swarming UAVs", *Journal of Field Robotics*, Vol. 36, No. 6, P. 1240–1255.

11. "Distributed Leader Follower Formation Control of Mobile Robots based on Bioinspired Neural Dynamics and Adaptive Sliding Innovation Filter". 2023. 19 p. available at: <https://arxiv.org/pdf/2301.01234.pdf>
12. Sytsma, J., Thompson, D., and Sicoli, J. (2023), "Drone Ultrasonic Detection", Australian International Aerospace Congress. P. 221–225. available at: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.063769306863002>
13. Kosanam, B., Kukkadapu, A. (2017), Swarm Intelligence Based Traffic Control System. *IRA-International Journal of Technology & Engineering*. P. 46-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.21013/jte.v7.n2.p5>
14. Tahir, A. (2023), "Formation Control of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles", Doctoral Dissertation, University of Turku, Turku, Finland. 449 p. available at: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-9411-3>
15. Pathak, R., Barzin, R. and Bora, G.C. (2018), "Data-driven precision agricultural applications using field sensors and Unmanned Aerial Vehicle", *International Journal of Precision Agriculture and Aviation*, Vol. 1(1), P. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.33440/j.ijpaa.20180101.0004>
16. Ali, Z.A. (2024), "Introductory chapter: Motion planning for dynamic agents", InTechOpen. available at: <https://www.intechopen.com/chapters/1178552>
17. Gielis, J., Shankar, A. and Prorok, A. (2022), "A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems", *Current Robot Reports*, Vol. 3(3), P. 213–225. DOI: 10.1007/s43154-022-00090-9

Надійшла (Received) 20.10.24

Відомості про авторів / About the Authors

Сна Максим Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри інформаційних технологій проектування, Харків, Україна; e-mail: yenamaxim98@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-0664-3244>

Yena Maksym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD Student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

UAV URBAN MOBILITY CONTROL: SWARM INTELLIGENCE AND COLLISION AVOIDANCE

Subject matter: Intelligent management of traffic flows in urban environments using swarm intelligence principles and collision avoidance algorithms to ensure safe and efficient urban mobility. Special attention is given to the management of unmanned vehicles and drones. **Goal:** To develop and analyze an approach to managing urban mobility that combines swarm intelligence principles and collision avoidance algorithms to optimize traffic flows, improve traffic safety, and reduce the number of accidents. **Tasks:** Investigate the safety and efficiency problems of urban transportation in the context of growing urbanization; develop a model that integrates swarm intelligence and collision avoidance algorithms for managing the movement of unmanned vehicles; conduct a series of experiments to test the effectiveness of the proposed approach; analyze the results of the experiments and determine the potential for improving urban mobility and ensuring road safety. **Methods:** Mathematical modeling of traffic flows using the swarm intelligence algorithm to coordinate the movement of unmanned vehicles and avoid collisions. **Results:** The proposed urban mobility management algorithm has demonstrated the ability to improve traffic flows, reduce the risk of collisions, and increase overall road safety. The results of the experiments confirmed the effectiveness of using swarm intelligence for coordination vehicles and collision avoidance algorithms to prevent accidents.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAVs); swarm, collision avoidance; urban drone mobility; integrated management systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Сна М. В. Контроль міської мобільності бпла: ройовий інтелект і уникнення зіткнень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.059>

Yena, M. (2024), "Uav urban mobility control: swarm intelligence and collision avoidance", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.059>

В. КАЛАШНІКОВА

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ РОЄМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Предметом дослідження є методи управління для автоматизованої мобільної системи, зокрема роєм БПЛА. **Мета роботи** – порівняльний аналіз централізованих, децентралізованих і розподілених методів управління для виявлення їх переваг і недоліків. **Завдання:** аналіз різних підходів до управління роєм БПЛА, оцінювання їх ефективності, надійності та застосовності в різних галузях. **Методи:** теоретичний аналіз наявних підходів, моделювання й симуляція для оцінювання їх продуктивності та надійності. Дослідження передбачають використання генетичних алгоритмів, ройових алгоритмів і штучних потенційних полів для управління траєкторіями БПЛА. **Результати.** Проведений аналіз демонструє, що централізовані методи забезпечують високу точність і координацію, але їм притаманні обмежені стійкість до збоїв і масштабованість. Децентралізовані методи забезпечують більшу гнучкість та стійкість, проте вони можуть мати проблеми з координацією між вузлами. Розподілені методи надають високу автономію та адаптивність, але потребують надійної комунікаційної інфраструктури. Генетичні алгоритми та ройові алгоритми ефективні для планування траєкторій БПЛА, однак мають високі обчислювальні витрати. **Висновки.** Упровадження різних методів управління залежить від конкретних вимог та умов завдання. Централізовані методи ефективні для завдань, де важливі точність і координація, децентралізовані – для завдань, де необхідні гнучкість та стійкість, а розподілені – для завдань, що потребують автономності та адаптивності. Подальші дослідження мають зосередитися на інтеграції різних підходів для підвищення ефективності та надійності систем управління роєм ботів.

Ключові слова: автоматизована система; управління; роботи; продуктивність; надійність; генетичні алгоритми; ройові алгоритми; централізоване управління; децентралізоване управління; розподілене управління.

Вступ

З розвитком технологій та зростанням потреб у автоматизованих системах БПЛА стали важливим інструментом у багатьох сферах, зокрема сільському господарстві, геодезії, під час рятувальних операцій та моніторингу навколишнього середовища. Управління роєм дронів є одним з найбільш перспективних і складних завдань, що дає змогу значно підвищити ефективність і автономність систем. Упровадження штучного інтелекту (ШІ) для розв'язання цього завдання відкриває нові можливості для підвищення якості та надійності системи, що робить окреслену тему актуальною для дослідження.

Управління роєм БПЛА є складним і багатоаспектним завданням, що вимагає ретельного підходу до вибору способу координації та контролю. Існує кілька основних підходів, що можна застосувати для управління роєм, і кожен з них має архітектурні особливості, переваги та обмеження.

– **Централізований підхід:** використовує один центральний контролер або командний центр, що приймає всі рішення та керує всіма БПЛА в рої. Централізоване управління визначається створенням єдиного основного вузла, що виконує всі принципові функції керування системою та її координації.

Зазначений підхід забезпечує високу точність та синхронізацію дій у складних і динамічних умовах.

– **Децентралізований підхід:** дає змогу кожному дрону в рої приймати рішення на місцевому рівні без необхідності постійного втручання з боку центрального контролера, що забезпечує більшу гнучкість і стійкість до збоїв. Зазначений підхід застосовується в таких сферах, як розвідка, рятувальні операції, логістика, доставка та екологічний моніторинг.

– **Розподілений підхід:** передбачає, що керування виконується через мережу, де кожен БПЛА взаємодіє та співпрацює з іншими апаратами, розподіляючи обов'язки й функції керування між багатьма вузлами. Розподілене управління застосовується для завдань, де важлива автономність і адаптивність.

Метою цієї роботи є теоретичний аналіз наявних підходів, моделювання й симуляція для оцінювання їх продуктивності та надійності. Дослідження передбачають використання генетичних алгоритмів, ройових алгоритмів і штучних потенційних полів для управління траєкторіями ботів. Завданнями дослідження є аналіз кількох підходів до керування роєм БПЛА, оцінювання їх ефективності, надійності та застосовності в різних галузях. Для досягнення поставленої мети впроваджувалися теоретичні дослідження та моделювання. Проведено серію

експериментів на основі симуляції роботи автоматизованих мобільних систем із використанням генетичних алгоритмів, ройових алгоритмів і методів штучних потенційних полів для керування траєкторіями ботів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розроблення ефективних методів керування роєм ботів є важливим завданням, що потребує глибокого аналізу наявних підходів. У науковій літературі розглядаються різні методи управління, зокрема централізовані, децентралізовані та розподілені підходи.

– **Централізовані методи управління** застосовують один контролер, що приймає всі рішення для роїв ботів, і є досить поширеними. Дослідження [1] продемонструвало, що централізоване керування забезпечує високу точність і координацію дій ботів, що є критичним для військових операцій. Проте дослідження *Yavuz et al.* [2] вказує на вразливість такого підходу до збоїв центрального контролера й на обмежену масштабованість системи.

– **Децентралізовані методи управління** дають змогу кожному БпЛА приймати рішення на місцевому рівні, що забезпечує більшу гнучкість і стійкість до відмов. Наприклад, *Roberge et al.* у праці [3] порівнюють генетичні алгоритми та алгоритми рою часток для планування траєкторій ботів у реальному часі. Дослідники виявили, що децентралізовані підходи є значно ефективнішими для швидкої адаптації до змін у навколишньому середовищі, проте потребують більш складної комунікаційної інфраструктури.

– **Розподілені методи управління** передбачають координацію між роботами за допомогою мережі, де кожен бот взаємодіє та співпрацює з іншими. *Bai et al.* [4] запропонували метод оптимального планування маршрутів для групи БпЛА, який поєднує штучні потенційні поля та інтерполяцію В-сплайнів. Учені довели, що такий підхід дає змогу ефективно уникати перешкод і забезпечувати безпечні траєкторії, проте потребує високої обчислювальної потужності.

– **Гібридні методи** поєднують елементи централізованих і децентралізованих підходів. Вони також активно досліджуються. Зокрема *Wang et al.* [5] розробили алгоритм, що використовує генетичні алгоритми для глобального планування завдань і алгоритми рою часток для локальної оптимізації.

Завдяки зазначеному підходу досягається висока ефективність і гнучкість системи, проте він потребує складного налаштування та значних обчислювальних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень демонструє, що кожен з підходів до управління роєм ботів має переваги й недоліки. Централізовані методи забезпечують високу точність та координацію, але їм властива обмежена стійкість до збоїв. Децентралізовані методи гарантують гнучкість і адаптивність, але вимагають складної комунікаційної інфраструктури. Розподілені методи поєднують переваги обох підходів, проте потребують високих обчислювальних потужностей. Гібридні методи – це перспективний напрям досліджень, оскільки вони поєднують переваги централізованих і децентралізованих підходів для досягнення високої ефективності та гнучкості системи управління роєм ботів.

Нерозв'язані проблеми та мета дослідження

Управління роєм ботів є одним із найбільш перспективних і складних завдань у сучасних автоматизованих системах. Наявні методи, зокрема централізовані, децентралізовані та розподілені, мають переваги та недоліки, що поки не повністю розв'язані та вимагають подальших досліджень.

Основні проблеми передбачають оптимізацію траєкторій руху ботів, де традиційні методи, такі як алгоритм A^* і штучні потенційні поля, мають обмеження в складних середовищах із численними перешкодами. Стійкість до збоїв залишається проблемою для централізованих систем управління, які є вразливими до збоїв центрального вузла. Масштабованість системи є ще однією проблемою, оскільки зі збільшенням кількості ботів у рої виникають труднощі з продуктивністю та ефективністю. Децентралізовані системи управління мають високу гнучкість, але вимагають складної комунікаційної інфраструктури.

Метою роботи є порівняльний аналіз методів керування роєм та виявлення їх переваг і недоліків. На основі цього аналізу буде розроблено методи управління, здатні покращити ефективність, надійність і гнучкість автоматизованих мобільних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно **розв'язати такі завдання:**

– дослідити літературу та проаналізувати наявні методи управління роєм ботів, зокрема централізовані, децентралізовані та розподілені підходи;

– проаналізувати різні підходи до планування траєкторій дронів, зокрема генетичні алгоритми, ройові алгоритми та штучні потенційні поля, оцінити їх ефективність у складних середовищах;

– розробити нові методи управління, що можуть забезпечити високу стійкість до збоїв та ефективне масштабування системи;

– провести моделювання та симуляцію запропонованих методів для оцінювання їх продуктивності та надійності в різних умовах;

– порівняти результати запропонованих методів з наявними підходами та виявити їх переваги й недоліки.

Отже, дослідження спрямоване на покращення ефективності та надійності автоматизованих мобільних систем за допомогою впровадження нових підходів до управління роєм ботів.

Матеріали й методи

У роботі розглядаються основні підходи до керування роєм ботів: централізований, децентралізований та розподілений методи. Кожен з них має архітектурні особливості, переваги та недоліки. Для порівняльного аналізу й оцінювання їх ефективності були впроваджені теоретичні методи та моделювання, зокрема генетичні алгоритми, ройові алгоритми й методи штучних потенційних полів.

Централізований метод призначення завдань є одним із найбільш поширених підходів у навігації роєм БпЛА. Він здебільшого застосовується для розподілу загального завдання на окремі підзавдання, бере до уваги їх кількість, типи та важливість, а також обмеження навколишнього середовища. Процедура планування цих підзавдань здійснюється за допомогою наземного терміналу призначення завдань, який генерує відповідні завдання для кожного безпілотного літального апарата в рої.

Автори дослідження [6] використовують генетичні алгоритми з інтегрованим розв'язувачем цілочисельного програмування для розв'язання проблеми шляху БпЛА в умовах обмеженого часу та вимог пріоритету. Цей підхід дає змогу оптимізувати маршрути руху апаратів, зважаючи на конкретні обмеження та пріоритети.

Централізований підхід до управління роєм БпЛА може значно виграти від використання генетичних алгоритмів з інтегрованим розв'язувачем цілочисельного програмування. Генетичні алгоритми (ГА) є еволюційним методом оптимізації, що імітує процес природного відбору, тоді як цілочисельне

програмування (ЦП) використовується для розв'язання задач оптимізації, де деякі або всі змінні мають бути цілочисельними.

Генетичні алгоритми можуть застосовуватися для ефективного планування завдань і розподілу ресурсів між БпЛА в рої, забезпечуючи глобальну оптимізацію системи. Інтеграція розв'язувача цілочисельного програмування дає змогу брати до уваги дискретні аспекти задачі, такі як кількість доступних БпЛА, завдання, що мають бути виконані, та обмеження на ресурси.

Архітектура централізованого підходу з ГА та ЦП

1. Центральний вузол

– Планування завдань: використовує генетичні алгоритми для оптимального розподілу завдань між БпЛА з огляду на поточну ситуацію та стан кожного апарата. ГА забезпечує ефективний пошук у просторі рішень, знаходячи наближено оптимальні рішення.

– Прийняття рішень: інтегрований розв'язувач цілочисельного програмування застосовується для точного розв'язання задач оптимізації з огляду на цілочисельні змінні та обмеження.

– Розподіл ресурсів: генетичні алгоритми дають змогу знаходити оптимальні стратегії розподілу обмежених ресурсів (наприклад енергії, часу) між БпЛА, забезпечуючи максимальну ефективність виконання завдань.

– Моніторинг: центральний вузол збирає та аналізує інформацію з усіх БпЛА для контролю виконання завдань і коригування дій за потреби. Упроваджуються методи машинного навчання для аналізу значних обсягів інформації в реальному часі.

2. БпЛА (агенти)

– Виконання завдань: виконують завдання, що надходять від центрального вузла, забезпечуючи високу точність та координацію дій.

– Збір даних: передають інформацію про своє положення, стан та виконання завдань до центрального вузла. Використовуються різноманітні сенсори, зокрема GPS, камери, лідари та інші датчики.

Центральний вузол застосовує генетичні алгоритми для оброблення даних, що надходять від БпЛА, та планування завдань на основі глобальної стратегії (рис. 1). Кожен безпілотний літальний апарат передає відомості про своє положення, стан та виконання завдань до центрального вузла, який потім використовує ці дані для коригування планів і оптимізації розподілу ресурсів.

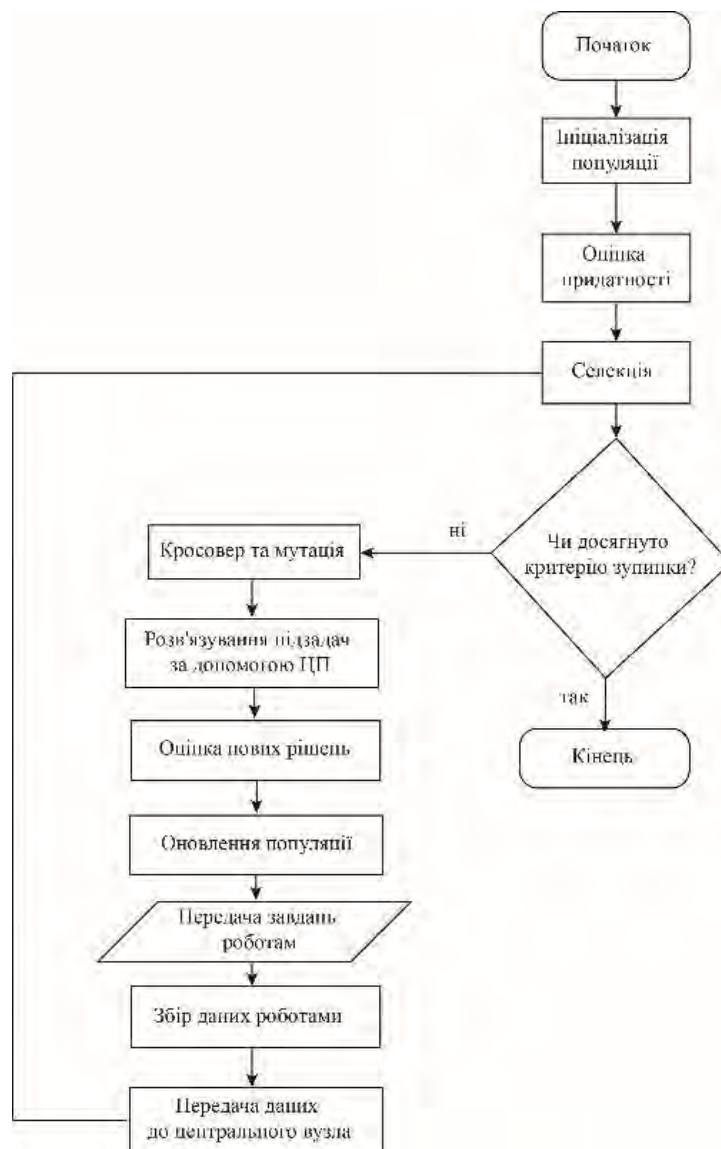


Рис. 1. Алгоритм централізованого підходу з використанням генетичних алгоритмів (ГА) та цілочисельного програмування (ЦП)

Формування початкової популяції: центральний вузол генерує початковий набір рішень (хромосом), кожне з яких є можливим розподілом завдань між БпЛА.

Оцінка придатності: кожна хромосома оцінюється на основі функції придатності, що бере до уваги такі критерії, як час виконання завдань, витрати енергії та ефективність застосування ресурсів.

Селекція: кращі рішення обираються для створення нового покоління, використовуючи такі методи, як турнірна селекція або рулеткова селекція.

Кросовер та мутація: обрані рішення піддаються операціям кросовера та мутації для генерування нових рішень, що поєднують властивості батьківських хромосом і мають випадкові зміни.

Інтеграція ЦП: на кожному етапі генетичного алгоритму розв'язувач цілочисельного програмування застосовується для точного розв'язання підзадач, беручи до уваги цілочисельні змінні та обмеження.

Переваги:

- генетичні алгоритми дають змогу знаходити глобально оптимальні рішення у просторі рішень з огляду на складні взаємозв'язки між змінними;
- інтеграція розв'язувача цілочисельного програмування допомагає точно враховувати дискретні аспекти задачі, забезпечуючи точність рішень;
- генетичні алгоритми ефективні в розв'язанні задач із значною кількістю змінних та обмежень, що забезпечує високу продуктивність системи;

– можливість адаптації алгоритмів до різних умов і змін у навколишньому середовищі.

Недоліки:

– генетичні алгоритми потребують значних обчислювальних ресурсів, особливо за умови великої кількості змінних та обмежень;

– процес еволюційної оптимізації може бути тривалим, особливо в разі значної кількості поколінь і складних функцій придатності.

Хоча ГА і мають високий потенціал знаходження глобально оптимальних рішень, вони не гарантують це в кожній ситуації, що може призвести до знаходження лише локально оптимальних рішень.

Генетичні алгоритми з інтегрованим розв'язувачем цілочисельного програмування є потужним методом для управління роєм БПЛА в централізованому підході. Вони забезпечують ефективну глобальну оптимізацію завдань і ресурсів, беручи до уваги дискретні обмеження. Цей підхід дає змогу досягти високої продуктивності та гнучкості системи, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів та часу на оброблення даних.

Управління траєкторіями руху БПЛА в складних тривимірних середовищах є одним із ключових завдань для забезпечення ефективного функціонування рою. Це завдання стає особливо важливим в умовах, де існують численні перешкоди та необхідно забезпечити безпеку й точність руху. Використання генетичних алгоритмів (ГА) та ройових алгоритмів (РА), таких як алгоритм рою часток (*Particle Swarm*

Optimization, PSO) або алгоритм мурашиних колоній (*Ant Colony Optimization*, ACO), дає змогу знаходити оптимальні траєкторії руху для кожного БПЛА з огляду на складність навколишнього середовища. Ройові алгоритми імітують соціальну поведінку тварин, зокрема мурах або риб, які працюють разом для досягнення спільної мети.

Перелічимо основні етапи РА.

– **Ініціалізація.** Випадкове генерування початкових позицій часток або агентів.

– **Оцінювання.** Кожен агент оцінює свою позицію на основі функції придатності.

– **Оновлення.** Агент оновлює свою позицію, зважаючи на свої найкращі досягнення та досягнення сусідів (у випадку PSO) або прямує по слідах феромонів (у випадку ACO).

– **Ітерація.** Процес повторюється до досягнення оптимального рішення.

Дослідження [7] порівнює генетичні алгоритми та ройові алгоритми для планування траєкторій БПЛА у складних тривимірних середовищах. Використання генетичних і ройових алгоритмів дає змогу обчислювати оптимальні траєкторії руху з огляду на динаміку літальних апаратів. Інтеграція цих алгоритмів забезпечує високу гнучкість, адаптивність та ефективність системи, допомагаючи БПЛА виконувати завдання з мінімальними енерговитратами та високою точністю, навіть у складних умовах. Порівняння централізованих методів призначення завдань подано в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця для централізованих методів призначення завдань

Критерій	Генетичні алгоритми (ГА)	Інтеграція генетичних алгоритмів та цілочисельного програмування (ГА + ЦП)	Ройові алгоритми (РА)
Точність та координація	висока точність та координація	висока точність та координація	висока точність та координація
Оптимізація	глобальна оптимізація	глобальна оптимізація з огляду на дискретні обмеження	глобальна оптимізація
Стійкість до збоїв	обмежена стійкість до збоїв	обмежена стійкість до збоїв	обмежена стійкість до збоїв
Масштабованість	обмежена масштабованість	обмежена масштабованість	обмежена масштабованість
Обчислювальні витрати	високі обчислювальні витрати	дуже високі обчислювальні витрати	високі обчислювальні витрати
Час оптимізації	тривалий	дуже тривалий	тривалий
Гнучкість та адаптивність	висока	висока	висока
Розподіл ресурсів	ефективний розподіл ресурсів	дуже ефективний розподіл ресурсів	ефективний розподіл ресурсів
Врахування дискретних обмежень	обмежене	точне врахування дискретних обмежень	обмежене
Застосування в умовах пріоритетів	обмежене	ефективне вирішення проблеми шляху з огляду на обмежений час і вимоги пріоритету	обмежене
Моніторинг та коригування завдань	високий рівень	високий рівень	високий рівень
Приклади застосування	розподіл завдань між БПЛА, планування траєкторій	оптимізація маршруту БПЛА з огляду на пріоритети й обмеження	планування траєкторій руху в складних середовищах

Генетичні алгоритми забезпечують високу точність і координацію, але мають високі обчислювальні витрати. Інтеграція генетичних алгоритмів із цілочисельним програмуванням дає змогу брати до уваги дискретні обмеження, забезпечуючи більш точні рішення, але потребує значних обчислювальних ресурсів. Ройові алгоритми також забезпечують високу точність та координацію, але мають обмежену стійкість до збоїв і високі обчислювальні витрати. Отже, вибір методу залежить від конкретних вимог і умов завдання. Використання генетичних і ройових алгоритмів для управління траєкторіями руху БпЛА в складних тривимірних середовищах є потужним підходом, що дає змогу ефективно розв'язувати задачі оптимізації. Інтеграція цих алгоритмів забезпечує високу гнучкість, адаптивність і ефективність системи, допомагаючи БпЛА виконувати завдання з мінімальними енерговитратами та високою точністю, навіть у складних умовах.

На відміну від централізованого методу призначення завдань, *розподілений метод призначення завдань* передбачає можливість передавати інформацію про кожен безпілотний літальний апарат назад до терміналу призначення завдань, зокрема проводити декомпозицію та розподіл завдань. Унаслідок цього термінал призначення завдань виконує функцію міжмережного з'єднувача [9], який дає змогу системі (зграї БпЛА) формувати мережну структуру, сприяючи обміну інформацією, координації завдань та вирішенню конфліктів між БпЛА за допомогою міжмережного з'єднувача.

Основні методи розподіленого призначення завдань передбачають теоретичні підходи багатоагентних систем і методи, аналогічні ринковим механізмам [10]. Теоретичні методи багатоагентних систем розглядають кожен БпЛА як автономну розумну сутність, що керує взаємодією всіх агентів, аналізуючи та інтерпретуючи цільове завдання, розбиваючи загальне завдання на невеликі підзавдання та розподіляючи їх між агентами. Після цього агенти співпрацюють для досягнення цільового завдання [11]. Методи, аналогічні ринковим механізмам, використовують ринкові моделі, зокрема укладання контрактів та аукціонування, для декомпозиції завдань. Розкомпоновані завдання стають доступними для торгів через відкриті торги або аукціони, де БпЛА роблять ставки відповідно до їх фактичної ситуації та стану польоту. У кінцевому підсумку завдання призначаються на основі фактичного результату аукціону [12].

Розподілене призначення завдань у багатоагентних системах (БАС) є критично важливим аспектом для ефективного функціонування рою БпЛА (рис. 2). Це завдання передбачає розподіл і координацію завдань між автономними агентами (БпЛА) без централізованого контролю. Методи розподіленого призначення завдань можуть використовувати теоретичні підходи БАС, а також підходи, аналогічні ринковим механізмам.



Рис. 2. Архітектура розподіленого методу призначення завдань

На рис. 2 зображена архітектура розподіленого методу призначення завдань у багатоагентних системах. Вона демонструє взаємодію між центральним вузлом управління, агентами (БпЛА) та алгоритмами планування завдань. Центральний вузол управління виконує функцію координації та комунікації між агентами, запуск алгоритмів планування завдань. Агенти (БпЛА) виконують завдання на основі визначених оптимальних шляхів. Алгоритми планування завдань:

- аукційні методи – організовують процеси аукціонів для розподілу завдань;
- контрактні мережі – встановлюють контракти між агентами для виконання завдань;
- алгоритми маркування – використовують мітки для координації завдань.

Потоки інформації від агентів до центрального вузла управління – інформація про стан та позиції БпЛА; від центрального вузла управління до БпЛА – оптимальні завдання та команди для виконання.

Процеси планування завдань

1. Аукційні методи. Завдання оголошує центральний вузол або інший агент. Агенти подають свої ставки з огляду на власні ресурси та можливості.

Завдання призначається агенту з найкращою ставкою. Цей підхід забезпечує гнучкість і може адаптуватися до змін у середовищі та можливостях агентів. Може потребувати значних обчислювальних ресурсів і часу для проведення аукціонів.

2. Контрактні мережі. Агент, який має завдання, пропонує контракт іншим агентам. Інші агенти можуть приймати або відхиляти контракт, зважаючи на свої можливості. Забезпечує ефективний розподіл завдань і здатний брати до уваги зміни в середовищі. Може бути складним у реалізації та вимагати значного обміну інформацією між агентами.

3. Алгоритми маркування. Завдання позначаються мітками, що відтворюють їх пріоритет або вимоги. Агенти обирають завдання, керуючись мітками, і виконують їх. Простий у реалізації та ефективний для певних типів завдань. Може не зважати на всі можливості агентів і ресурси, що призводить до субоптимальних рішень.

Методи, аналогічні ринковим механізмам, використовують економічні моделі для розподілу завдань між агентами. Ці підходи передбачають:

– механізм Вікрі – Кларка – Гровса (VCG): агенти подають свої справжні оцінки вартості виконання завдань. Завдання призначаються на основі цих оцінок, максимізуючи загальну корисність. Забезпечує оптимальний розподіл завдань і заохочує агентів до правдивості. Може бути складним у реалізації та вимагати значних обчислювальних ресурсів;

– ринкова метафора: завдання виставляються на ринок, і агенти купують або продають права на виконання завдань на основі своїх ресурсів і можливостей. Забезпечує гнучкість і здатний адаптуватися до змін у середовищі та можливостях агентів. Може потребувати значних обчислювальних ресурсів і часу для функціонування ринку.

Порівняння розподілених методів призначення завдань подано в табл. 2.

Таблиця 2. Порівняння розподілених методів призначення завдань

Критерій	Аукціонні методи	Контрактні мережі	Алгоритми маркування	Механізм Вікрі – Кларка – Гровса (VCG)	Ринкова метафора
Точність і координація	високі	високі	високі	високі	високі
Оптимізація	глобальна	глобальна	глобальна	глобальна	глобальна
Стійкість до збоїв	висока	висока	висока	висока	висока
Масштабованість	висока	висока	висока	висока	висока
Обчислювальні витрати	високі	високі	високі	дуже високі	високі
Час оптимізації	тривалий	тривалий	тривалий	дуже тривалий	тривалий
Гнучкість та адаптивність	високі	високі	високі	високі	високі
Розподіл ресурсів	ефективний	ефективний	ефективний	дуже ефективний	ефективний
Врахування дискретних обмежень	обмежене	обмежене	обмежене	точне врахування дискретних обмежень	обмежене
Застосування в умовах пріоритетів	обмежене	обмежене	обмежене	ефективне розв'язання проблеми шляху з огляду на обмежений час і вимоги пріоритету	обмежене
Моніторинг та коригування завдань	високий рівень	високий рівень	високий рівень	високий рівень	високий рівень
Приклади застосування	розподіл завдань між БпЛА, планування траєкторій	розподіл завдань між БпЛА, планування траєкторій	розподіл завдань між БпЛА, планування траєкторій	оптимізація маршруту БпЛА з огляду на пріоритети та обмеження	розподіл завдань між БпЛА, планування траєкторій

Порівняння розподілених методів призначення завдань показує, що як теоретичні підходи багатоагентних систем, так і методи, аналогічні ринковим механізмам, мають переваги та недоліки. Теоретичні підходи забезпечують високу точність і координацію, однак обмежені в масштабованості та потребують значних обчислювальних ресурсів. Методи, аналогічні ринковим механізмам,

забезпечують високу гнучкість та ефективність у складних середовищах, але також потребують значних ресурсів.

Комунікаційна кооперативна навігація є основним методом навігації для зграї безпілотних літальних апаратів. Зазначений метод передбачає, що зграя БпЛА під час польоту не залежить лише від наземних станцій чи супутників для керування. Натомість

кожен БПЛА, використовуючи інформацію, отриману високоточними сенсорами, зокрема місце розташування та стан, розглядає себе як вузол комунікації. За допомогою бездротових модулів передачі даних, таких як *Bluetooth*, *ZigBee* чи *WiFi*, у зграї БПЛА встановлюється бездротова мережа для обміну інформацією, сприяючи співпраці між різними безпілотними літальними апаратами та формуванню єдиної сутності [13].

Комунікаційна кооперативна навігація може результативно підвищити загальні операційні можливості та розширюваність системи зграї БПЛА, і вона ефективно допомагає іншим методам комунікації. Із зростанням кількості безпілотних літальних апаратів у системах зграї збільшується і обсяг генерованих даних. Наявна архітектура зграї БПЛА, яка вирізняється протоколами MAC та алгоритмами маршрутизації, стикається з викликами в роботі із значним обсягом інформації, що впливає на загальну якість функціонування системи [14].

Для покращення продуктивності автори запропонували модель глибокого навчання Q (DQN), призначену для оптимізації загальної продуктивності мережі, зважаючи на динамічну топологію зграї та мінливі умови зв'язку [15]. Інше дослідження запропонувало багатометодну комбіновану стратегію комунікації БПЛА, яка інтегрує стратегію зв'язку безпілотних літальних апаратів за допомогою мобільної мережі, розглядаючи кожен БПЛА як ретрансляційний вузол для передачі даних.

Режим комунікаційної кооперативної навігації зграї БПЛА дає змогу створювати мережу незалежно від інших попередньо створених мережних засобів. Він здатний автоматично формувати мережу будь-якому оперативному сценарію та динамічно змінювати структуру мережі відповідно до конкретних операційних вимог, наділяючи цей режим міцною здатністю до антиінтерференції. Блок-схема комунікаційного колаборативного навігаційного режиму подана на рис. 3.

Швидкість БПЛА в цьому режимі здебільшого коливається в діапазоні від 5 м/с до 15 м/с. За умови вищих швидкостей зміни топології мережі зв'язку підвищують навантаження на мережу та збільшують затор даних, що впливає на передачу інформації в реальному часі. Бездротові зв'язки та рухома топологія мережі БПЛА вразливі до різних рівнів загроз безпеки, зокрема радіочастотного втручання та інших факторів. Значна кількість зайвої

інформації, що генерується під час польотів, впливає на ефективність передачі даних через обмежену бездротову пропускну здатність, що призводить до тривалої затримки.

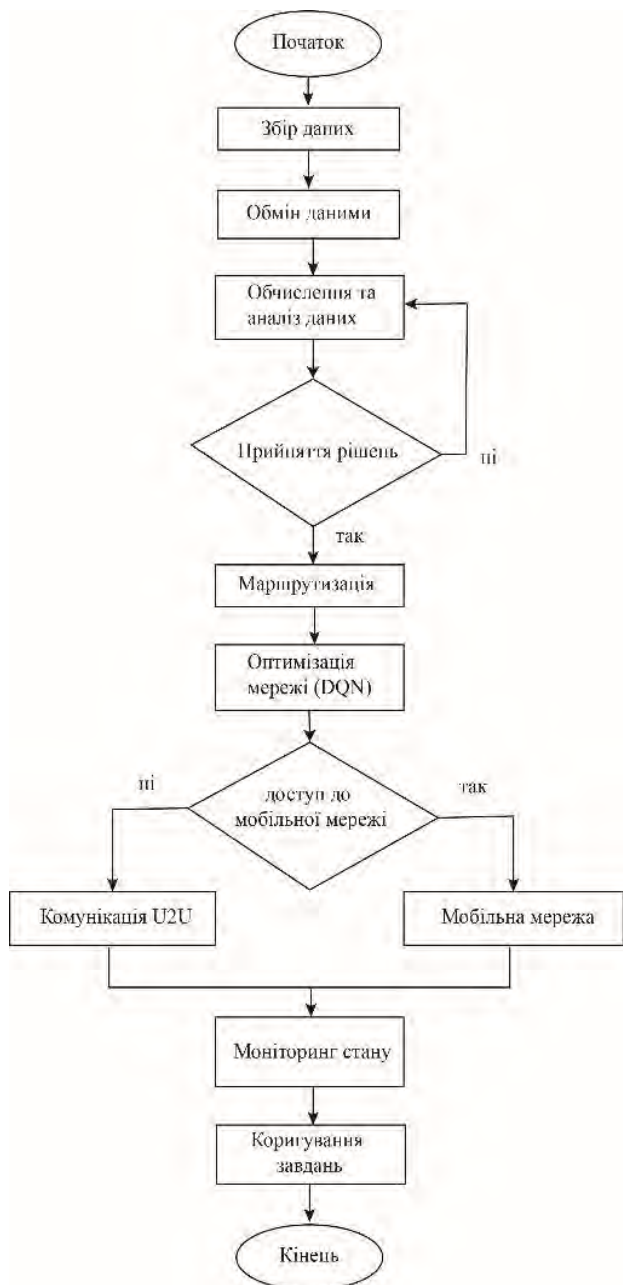


Рис. 3. Алгоритм комунікаційного колаборативного навігаційного режиму

Порівняння методів комунікаційного колаборативного навігаційного режиму призначення завдань подана в табл. 3.

Режим комунікаційної кооперативної навігації для зграї безпілотних літальних апаратів демонструє значний потенціал для підвищення загальних

операційних можливостей та розширюваності системи. Він дає змогу автоматично формувати мережу в будь-якому оперативному сценарії та динамічно змінювати структуру мережі відповідно

до конкретних операційних вимог. Такий підхід забезпечує високу точність, координацію та стійкість до збоїв, водночас забезпечуючи гнучкість і адаптивність системи.

Таблиця 3. Порівняльний аналіз методів комунікації та навігації

Критерій	Традиційна комунікація	Комунікаційна кооперативна навігація
Точність та координація	високі	високі
Оптимізація	помірна	висока
Стійкість до збоїв	низька	висока
Масштабованість	низька	висока
Обчислювальні витрати	низькі	високі
Час оптимізації	довгий	короткий
Гнучкість і адаптивність	низькі	високі
Розподіл ресурсів	центральний	розподілений
Врахування дискретних обмежень	високе	високе
Застосування в умовах пріоритетів	обмежене	широке
Моніторинг і коригування завдань	обмежені	високі
Приклади застосування	розвідка, моніторинг	пошуково-рятувальні операції

Однак існують певні виклики, зокрема потреба в удосконаленні протоколів мережі, забезпечення безпеки комунікацій та ефективне керування значним обсягом інформації. Застосування методів глибокого навчання та багатометодних комбінованих стратегій може значно покращити ефективність і продуктивність системи.

Режим комунікаційної кооперативної навігації є перспективним напрямом для майбутніх досліджень, що дає змогу забезпечити високу автономію та ефективність виконання завдань зграєю БпЛА в різних умовах експлуатації.

Останні досягнення в алгоритмах розпізнавання, пов'язаних із баченням, вивели візуальну навігацію на перший план як значущу тему досліджень у внутрішніх і міжнародних сферах навігації. Порівняно з традиційними радіосенсорами, візуальні сенсори мають перевагу компактності та вартості. Зокрема зображення, зібрані візуальними сенсорами, містять значну кількість інформації, яка, спільно з дедалі більш вдосконаленими візуальними алгоритмами, робить візуальну навігацію високоефективним методом. Під час візуальної кооперативної навігації в зграї БпЛА зафіксовують інформацію про особливості інших безпілотних літальних апаратів за допомогою візуальних сенсорів. Цю інформацію потім обробляють за допомогою моделювання, фільтрації та інших технік для відстеження цілей, які задовольняють певні вимоги. Оцінюючи їх рух на основі положення цілі, БпЛА налаштовують фактори, зокрема положення польоту

чи швидкість, щоб дотримуватися заздалегідь встановлених обмежень та завершити навігаційний політ зграї безпілотних літальних апаратів [16].

У візуальному колаборативному навігаційному режимі для зграї БпЛА основна інформація управління для безпілотних літальних апаратів виводиться лише з інформації особливостей, наданої візуальними сенсорами. Отже, результати, отримані за допомогою візуального аналізу, безпосередньо впливають на якість польоту та безпеку БпЛА. Основною технологією у візуальній кооперативній навігації для зграї безпілотних літальних апаратів є вилучення інформації про особливості з БпЛА на підставі зображень, зібраних візуальними сенсорами, та об'єднання цієї вилученої інформації з даними інерційної навігації БпЛА для виконання трекінгового польоту. Візуальний колаборативний навігаційний режим для зграї БпЛА може бути поділений на три типи: навігація з візуальним керуванням, навігація з об'єднанням інформації візуальних джерел та візуальна навігація SLAM.

Візуально керована навігація – це техніка, за умови якої БпЛА під час польоту зграєю отримують всю інформацію про особливості та розташування за допомогою візуальних сенсорів. Використовуючи ці показники та задані обмеження, БпЛА регулюють свій статус польоту для відстеження польоту одного безпілотного літального апарата або зграї, тим самим досягаючи координованого польоту зграї БпЛА. Цей метод застосовується найчастіше в областях, де сигнали GNSS (Глобальна

навігаційна супутникова система) слабкі чи відсутні. Завдяки своєму покладанню на пряме візуальне відстеження для польоту він ефективно обходить перешкоди, зумовлені сигналами GNSS.

Типовою технікою візуального керівництва є підхід "лідер – послідовник" (рис. 4). За цим методом деякі БПЛА виконують роль лідерів, тоді як інші діють як фоловери в зграї [17]. Кожен фоловер має принаймні одного визначеного лідера, і в межах системи зграї деякі БПЛА можуть виконувати роль і лідера, і послідовника. Така ієрархічна структура спрощує систему зграї до однієї проблеми планування руху. У ланцюгоподібній структурі кожен БПЛА лише має слідувати за попереднім апаратом.

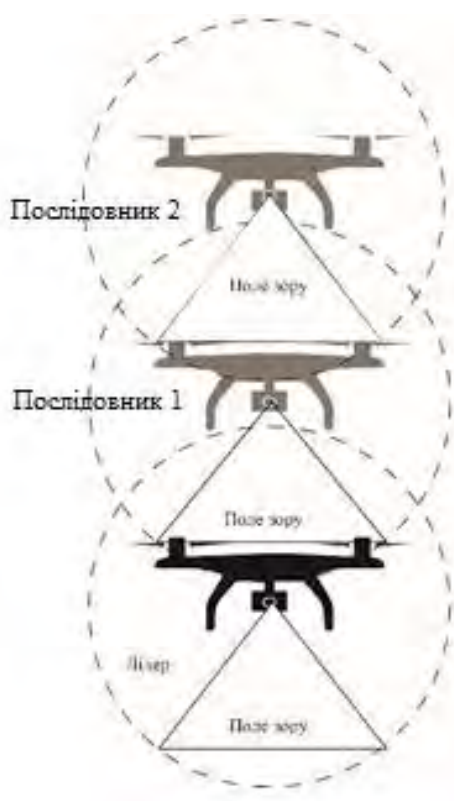


Рис. 4. Візуальна навігації на основі підходу "лідер – послідовник"

На рис. 4 зображено схему візуального наведення в рої БПЛА, де лідер та два послідовники (послідовник 1 і послідовник 2) взаємодіють один з одним за допомогою візуальних сенсорів, дотримуючись оптимальної дистанції. Кожен робот має своє поле зору, що дає змогу послідовникам 1 і 2 орієнтуватися на позицію лідера та на один одного для підтримання рою в заданій формації.

Опишемо наявні системи візуального управління роями БПЛА.

1. Автономний рій безпілотних літальних апаратів з візуальною підтримкою. Лідер оснащений системами LIDAR і камерами для візуальної навігації та точного визначення свого місця в просторі. Послідовники використовують ті самі технології для відстеження руху лідера. Вони формують злагоджену групу, або кластер, рухаючись за лідером відповідно до визначеної траєкторії. Цей підхід дає змогу підтримувати постійну відстань між БПЛА та забезпечує точне й безпечне пересування рою в просторі.

2. Приклад використання візуальної навігації в разі обмеженої видимості. У складних умовах довкілля, наприклад туману, диму або відсутності зовнішніх орієнтирів, візуальна підтримка LIDAR у поєднанні з камерами дає змогу кожному БПЛА розпізнавати об'єкти та інші безпілотні літальні апарати в рої. Це допомагає рою зберігати свою координату та рухатись ефективно навіть в умовах, коли традиційні методи навігації можуть бути неефективними.

3. Система автономного рою з гнучким реагуванням на перешкоди. Завдяки тому, що кожен БПЛА може відстежувати рух лідера й відповідно координувати свою траєкторію, рій може швидко адаптуватися до змін у середовищі. Наприклад, якщо лідер змінює маршрут для уникнення перешкод, послідовники автоматично коригують свої траєкторії, забезпечуючи злагоджений рух всієї групи без необхідності в централізованому контролі.

Підхід візуального управління дає змогу системам зграї БПЛА ефективно функціонувати в областях, де відсутні сигнали GPS, розширюючи потенційні сценарії застосування таких систем і вводячи новий метод їх роботи. Необхідно зауважити, що, оскільки візуальне керівництво цілком залежить від інформації, наданої візуальними сенсорами, це висуває неабиякі вимоги до надійності як візуальних сенсорів, так і алгоритмів візуального розпізнавання. Крім того, через те, що візуальні сенсори чутливі до змін інтенсивності світла, а вимоги візуального розпізнавання можуть коливатися в різних умовах освітлення, підвищення надійності алгоритмів візуального розпізнавання залишається важливою метою дослідження.

На відміну від методу візуального керівництва, що використовує тільки бачення для навігації системи зграї БПЛА, *візійно-допоміжний метод* інтегрує інформацію від GPS, блоків інерційного вимірювання (IMU) та магнітних (MAG) сенсорів, доповнюючи це застосуванням бачення для видобуття

та відстеження особливостей [18]. Основний БпЛА просторово локалізується за допомогою GPS та прямує заздалегідь визначеним маршрутом. Потім фоловер БпЛА використовує візійні сенсори для видобуття інформації про особливості основного апарата. Після отримання відповідних просторових відомостей він об'єднує інформацію з багатьох джерел, зокрема GPS, IMU та MAG, на фоловері. Це приводить до формування маршруту польоту, визначеного оптимальним методом отриманої з об'єднання інформації з багатьох джерел.

Типовий візійно-допоміжний метод – це метод "батько – дитина". У цьому підході тільки один БпЛА розглядається як "батько" й не вимагає встановлення візуальних сенсорів. Замість цього він безпосередньо використовує GPS для локалізації маршруту. Принаймні один чи кілька БпЛА, які виконують ролі дітей і обладнані візуальними та іншими позиційними сенсорами, зокрема GPS, IMU та MAG. Водночас БпЛА-"діти" можуть реалізовувати функції батьків для інших безпілотних літальних апаратів.

Візійно-допоміжний метод дає змогу краще втілювати в життя відстеження та локалізацію БпЛА під час польоту завдяки об'єднанню інформації з багатьох джерел сенсорів. Це покращує точність операційної роботи системи зграї безпілотних літальних апаратів.

Візуальна одночасна локалізація та картографування (V-SLAM) – це технологія, що використовує візуальні сенсори для синхронного виконання зазначених завдань (рис. 5). Хоча вона може надавати послуги для наземних роботів, але також застосовується в локалізації та навігації БпЛА [19, 20]. V-SLAM містить п'ять основних компонентів: отримання інформації від сенсора, візуальна одометрія на передньому фронті, нелінійна оптимізація на задньому фронті, виявлення замкнення петлі та побудова карти [21].

У ситуаціях, коли БпЛА не має апріорної інформації про довкілля, він спочатку отримує та обробляє інформацію зображення за допомогою візійного сенсора. Потім передня візуальна одометрія використовує інформацію про зображення, зняту візійним сенсором, та пов'язані відомості про позицію для відтворення 3D-руху камери, що надає локалізовану карту руху. Однак передня візуальна одометрія може надавати траєкторії та карти лише на короткий період і не здатна забезпечити всі карти. Тому необхідно використовувати нелінійну оптимізацію на задньому фронті для відповідності

оптимальної траєкторії протягом тривалого періоду до великомасштабної оптимізації оптимального картографування, що сприяє побудові карти. Передня візуальна одометрія бере до уваги лише взаємозв'язок сусідніх кадрів часу та не спроможна будувати глобально консистентні траєкторії та карти. Виявлення замкнення петлі може ефективно визначити випадки, коли камера проходить крізь одне й те саме місце кілька разів, забезпечуючи довші обмеження, ніж у ситуації сусідніх кадрів.

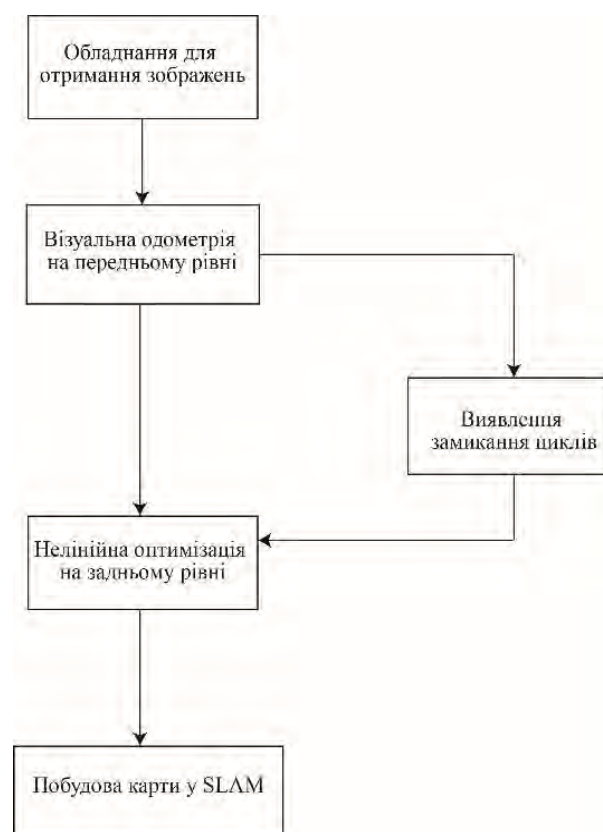


Рис. 5. Етапи візуальної одночасної локалізації та побудови карти (V-SLAM)

Візуальна спільна ко-навігація зграї БпЛА на основі технології V-SLAM підвищує незалежність та антиінтерференційні можливості безпілотних літальних апаратів [22]. Однак вроджені обмеження V-SLAM часто стають помітними в такий спосіб: по-перше, типові повітряні зображення можуть виявляти явища локального розмиття, що впливає на точність локалізації БпЛА; по-друге, великі операції інтеграції можуть спричинити кумулятивні помилки, які впливають на точність системи. Крім того, SLAM сама стикається з проблемами невизначеності та дрейфу масштабу, що, ймовірно, серйозно впливатиме на результати системи.

Режим візуальної спільної ко-навігації зграї БПЛА застосовує візуальні сенсори для прямої спільної навігації позицій безпілотних літальних апаратів. Забезпечуючи надійну відносну інформацію про позицію та орієнтацію системи зграї БПЛА, вона дає змогу кожному апарату в системі зграї використовувати візуальні сенсори для оцінювання відносних положень та відстаней інших БПЛА власною системою координат. З наявністю GPS візуальна навігація може сприяти навігаційній інформації, полегшуючи спільну навігацію зграї БПЛА. У разі відмови GPS візуальна навігація може бути незалежною системою навігації для здійснення відносної навігації між БПЛА в зграї. Крім того, візуальна навігація здатна досягти спільної навігації системи зграї безпілотних літальних апаратів без взаємної комунікації між ними, роблячи це необхідним засобом спільної навігації в складних середовищах. Однак наразі візуальна спільна навігація зграї БПЛА все ще має кілька недоліків:

- складність середовища, де працює система зграї БПЛА, потребує розроблення стійкого алгоритму розпізнавання. Цей алгоритм має зменшити перешкоди для розпізнавання БПЛА від інших об'єктів і точно ідентифікувати та відстежувати апарати в складному середовищі;

- щодо оброблення даних: тоді як візуальні сенсори надають чимало інформації, вони також генерують значну її кількість. Зі збільшенням кількості БПЛА в системі зграї кількість даних, яку генерує візуальний сенсор, зростає експоненційно. Тому оброблення та використання отриманої візуальної інформації – це ключова проблема;

- після отримання ефективних і надійних даних важливо сформулювати розумну логіку та стратегію управління для реалізації системи зграї БПЛА;

- вивчення стратегій, що забезпечують максимальну ефективність роботи системи зграї БПЛА за мінімального споживання ресурсів під час реального польоту, також є напрямом, вартим дослідження.

Результати досліджень та їх обговорення

У процесі моделювання централізованого методу управління роєм безпілотних літальних апаратів було застосовано середовище *CoppeliaSim*, де кожен дрон моніторив центральний контролер. Для реалізації сценарію централізованого управління було використано мову програмування *Lua*, що забезпечило інтеграцію алгоритмів керування в симуляційне середовище. На рис. 6 зображено модель централізованого управління роєм БПЛА.

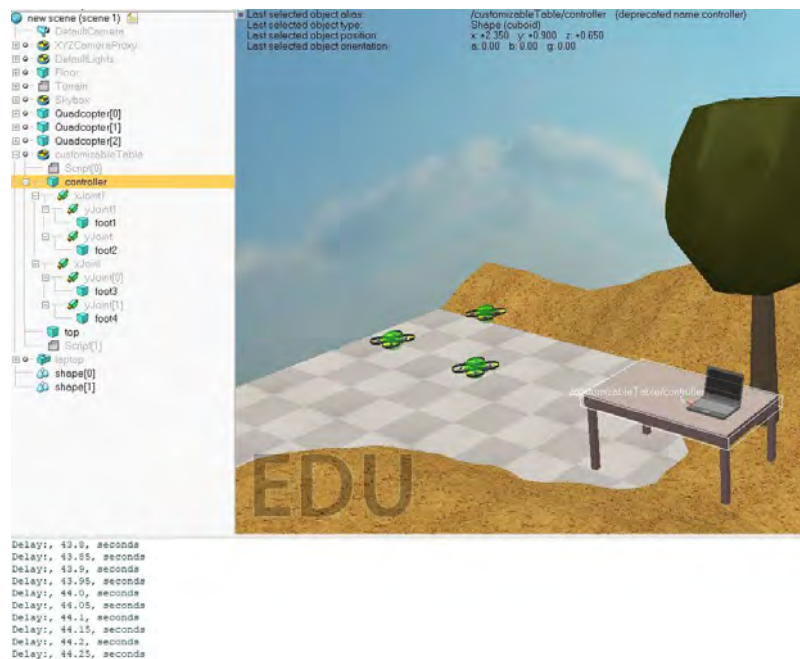


Рис. 6. Централізоване управління роєм БПЛА в *CoppeliaSim*

Центральний контролер, запрограмований на прийняття рішень і передачу команд кожному дрону, використовував функції *Lua* для динамічного

встановлення позицій дронів на основі вхідних показників. Моделювання проводилося для оцінювання ефективності централізованого

управління, зокрема за такими критеріями: затримка прийняття рішень, стійкість системи до відмов, обчислювальні витрати.

Унаслідок було встановлено, що централізоване управління роями БПЛА є ефективним для невеликих груп (до 5–10 апаратів), де середня затримка в процесі прийняття рішень становила близько 50 мс. Це уможливило швидку реакцію на зміни в умовах середовища та координування дії дронів із високою точністю. Однак у разі збільшення кількості дронів (понад 15 одиниць) затримка в прийнятті рішень збільшується експоненційно, досягаючи 150–200 мс для груп з 20 БПЛА. Це може бути критичним у ситуаціях, де необхідно швидко реагувати на зовнішні зміни.

Крім того, централізовані системи виявилися вразливими до відмов центрального контролера.

За умови його несправності вся система втрачала працездатність, що робить цей підхід менш надійним у великих роях або в системах, де важлива висока стійкість до збоїв. Обчислювальні витрати виявилися невисокими, оскільки основні обчислення виконувалися на рівні одного центрального вузла.

На основі проведеного моделювання розподіленого управління дронами в середовищі *CoppeliaSim* були досягнуті певні результати. На рис. 7 зображена сцена симуляції, де кожен квадрокоптер функціонує незалежно, використовуючи інформацію від інших агентів за допомогою механізму обміну даними. Цей підхід ґрунтується на розподіленій архітектурі, де кожен агент може самостійно приймати рішення на основі отриманих повідомлень з інших дронів.

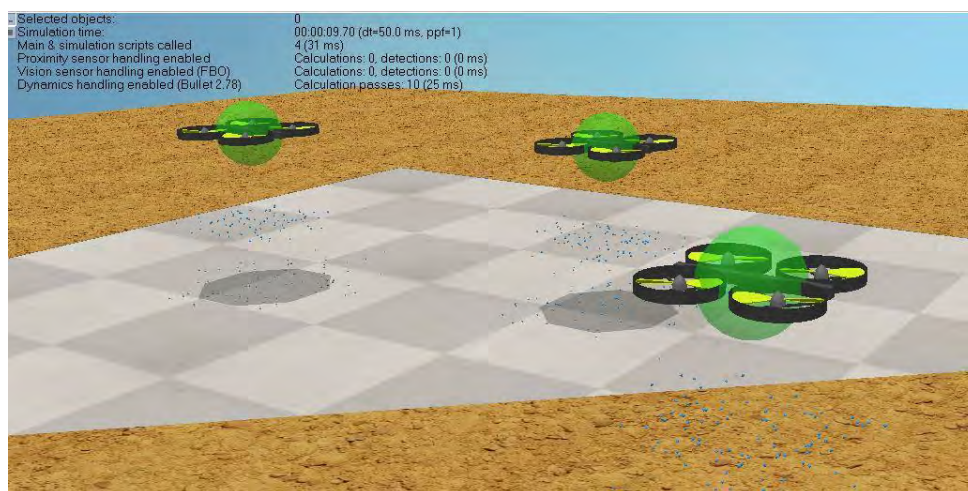


Рис. 7. Розподілене управління роєм БПЛА в *CoppeliaSim*

У процесі моделювання виявлено, що розподілені методи управління мають такі переваги:

- середня затримка в прийнятті рішень: завдяки використанню локальних даних і прямого обміну повідомленнями між дронами середня затримка у виконанні корекцій траєкторій залишалася на рівні 70 мс, незалежно від кількості агентів у рої;
- стійкість до збоїв: кожен агент здатний продовжувати функціонувати незалежно, навіть якщо один або кілька дронів виходять з ладу. Це дає змогу системі підтримувати загальну функціональність, навіть у разі часткових збоїв;
- обчислювальні витрати: система демонструє середній рівень обчислювальних витрат завдяки

тому, що кожен агент відповідає за власні обчислення. Це розвантажує центральний процесор і забезпечує стабільну продуктивність за умови зростання кількості агентів.

Обчислення та метрики

Під час симуляції були отримані такі метрики для оцінювання ефективності:

- затримка прийняття рішень: у середньому 70 мс;
- стійкість до збоїв: система продовжувала працювати, коли були навмисно вимкнені до 1 з 3 дронів;
- обчислювальні витрати: обчислювальні ресурси зростали лінійно зі збільшенням кількості дронів, не перевищуючи критичних показників.

Отже, розподілений метод продемонстрував значну стійкість та ефективність у сценаріях із великим роєм. Це робить його перспективним для використання в реальних умовах, де необхідна автономність агентів і стійкість до збоїв.

Для подальшого дослідження були протестовані алгоритми управління траєкторіями рою: генетичні та ройові.

Генетичні алгоритми (рис. 8) показали високу точність у розв'язанні задач оптимізації траєкторії. Середня помилка в знаходженні оптимальної траєкторії становила лише 2,5%. Однак обчислювальні витрати

були досить високими, і час обчислення зростає залежно від збільшення кількості агентів.

Щоб реалізувати генетичний алгоритм для управління траєкторіями дронів у *CoppeliaSim*, використовували мову *Lua* для скриптів і організували генетичний алгоритм таким чином, щоб він контролював траєкторії кожного БПЛА. У скрипті кожного безпілотної літального апарата створили початкову популяцію траєкторій.

Графік часу відгуку залежно від кількості БПЛА поданий на рис. 9.



Рис. 8. Моделювання генетичного алгоритму

Основна функція генетичного алгоритму:

```
function genetic_algorithm(targetPosition)
    local population_size = 100 -- Кількість траєкторій у популяції
    local generations = 50      -- Кількість поколінь
    local population = generate_population(population_size) -- Генерація початкової популяції

    for generation = 1, generations do
        local new_population = {}
        for i = 1, population_size / 2 do
            local parent1, parent2 = select_best_two(population, targetPosition)
            local child1 = mutate(crossover(parent1, parent2))
            local child2 = mutate(crossover(parent1, parent2))
            table.insert(new_population, child1)
            table.insert(new_population, child2)
        end
        population = new_population
    end
end
```

```
return select_best_two(population, targetPosition) [1] -- Повертаємо найкращу траєкторію
end
```

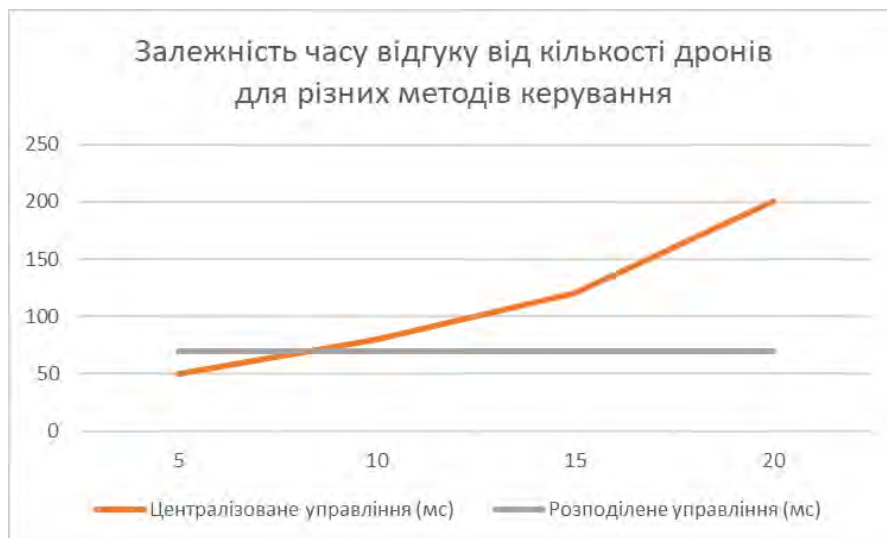


Рис. 9. Залежність часу відгуку від кількості дронів для різних методів керування

На графіку зображено залежність часу відгуку від кількості дронів для централізованого та розподіленого управління. Як видно, у централізованому підході час відгуку зростає експоненційно відповідно до збільшення кількості дронів, тоді як у розподіленому підході затримка залишається стабільною незалежно від кількості агентів.

Результати моделювання демонструють, що централізоване управління ефективно працює для невеликих груп дронів (до 10 БПЛА), забезпечуючи мінімальні затримки відгуку. Проте зі збільшенням кількості апаратів затримка суттєво зростає, обмежуючи його застосування в системах із значною кількістю агентів. Графік на рис. 9 ілюструє залежність часу відгуку від кількості дронів для централізованого та розподіленого методів керування. У разі централізованого управління час відгуку збільшується експоненційно, досягаючи 200 мс для груп із 20 дронів. Натомість розподілене керування показує стабільний час відгуку (близько 70 мс) незалежно від кількості дронів, що свідчить про його перевагу в умовах великого рою.

Отже, розподілені методи управління є перспективними для масштабованих систем, де важлива автономність і стійкість до збоїв. Централізоване управління доцільне для систем із незначною кількістю агентів, де необхідна висока точність координації.

Висновки

У процесі дослідження проаналізовано різні методи управління роєм безпілотних літальних апаратів, а саме централізовані, децентралізовані та розподілені. Кожен з методів має переваги та обмеження: централізоване управління забезпечує високу точність координації, однак йому властива обмежена масштабованість і стійкість до відмов, що робить цей метод неефективним за умови використання у великих роях. Децентралізовані методи надають значну автономність кожному агенту, але водночас можуть виникати проблеми з координацією між агентами, особливо в складних обставинах. Розподілені методи виявилися стійкішими до збоїв та забезпечують стабільну продуктивність за умови збільшення кількості агентів, що робить їх перспективними для масштабованих систем.

Застосування генетичних і ройових алгоритмів для оптимізації траєкторій БПЛА продемонструвало їх ефективність у розв'язанні завдань планування траєкторій. Однак генетичні алгоритми потребують значних обчислювальних ресурсів, що може обмежувати їх використання в реальних умовах. Ройові алгоритми, попри незначну втрату точності, виявилися швидкими та менш ресурсомісткими, що робить їх оптимальними для великих груп агентів.

Отже, вибір методу управління залежить від вимог до точності, масштабованості та стійкості системи. Для нечисленних груп, де важлива координація, доцільно застосовувати централізоване управління, тоді як для великих роїв, де пріоритетом є автономність і адаптивність, перевагу необхідно надавати розподіленим методам.

Подальші дослідження спрямовані на розроблення гібридних методів управління, що об'єднують переваги централізованих і децентралізованих підходів для покращення автономності та адаптивності систем.

Список літератури

1. Fu Z., Mao Y., He D., Yu J., Xie G. Secure Multi-UAV Collaborative Task Allocation. *IEEE Access*, 7, 2019. P. 35579–35587. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902221>
2. Yavuz H.S., Goktas H., Cevikalp H., Saribas H. Optimal Task Allocation for Multiple UAVs. In *Proceedings of the 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 5–7 October 2020; 2020. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302360>
3. Roberge V., Tarbouchi M., Labonté G. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), 2013. P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
4. Bai W., Wu X., Xie Y., Wang Y., Zhao H., Chen K., Li Y., Hao Y. A Cooperative Route Planning Method for Multi-UAVs Based on the Fusion of Artificial Potential Field and B-spline Interpolation. In *Proceedings of the 2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, 25–27 July 2018; 2018. P. 6733–6738. DOI: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483665>
5. Wang W., Lv M., Ru L., Lu B., Hu S., Chang X. Multi-UAV Unbalanced Targets Coordinated Dynamic Task Allocation in Phases. *Aerospace*, 9(9), 2022. 491 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090491>
6. Wang X., Bai Y., Sun Z., et al. Deep Reinforcement Learning-Based Air Combat Maneuver Decision-Making: Literature Review, Implementation Tutorial, and Future Direction. *Artificial Intelligence Review*, 57(1), 2024. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10620-2>
7. Yavuz H.S., Goktas H., Cevikalp H., Saribas H. Optimal Task Allocation for Multiple UAVs. In *Proceedings of the 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 5–7 October 2020; P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302360>
8. Roberge V., Tarbouchi M., Labonté G. Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), 2013. P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
9. Jia G.W., Wang J.F. Research Review of UAV Swarm Mission Planning Method. *Systems Engineering and Electronics*, 43(1), 2021. P. 99–111.
10. Lizzio F.F., Capello E., Guglieri G. (2022). A Review of Consensus-Based Multi-Agent UAV Implementations. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 106(2), 2022. 43 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01391-5>
11. Ammoniaci M., Kartsiotis S., Perria R., Storch P. (2021). State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture. *Agriculture*, 11(3), 2021. 201 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>
12. Yang T., Shen X.S. Mission-Critical Search and Rescue Networking Based on Multi-Agent Cooperative Communication. *Springer Singapore Pte. Limited: Singapore*; 2020. P. 55–76. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4412-5_5
13. Koushik A.M., Hu F., Kumar S. Deep-Learning-Based Node Positioning for Throughput-Optimal Communications in Dynamic UAV Swarm Network. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(3), 2019. P. 554–566. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCCN.2019.2907520>
14. Hellaoui H., Chelli A., Bagaa M., Taleb T. UAV Communication Strategies in the Next Generation of Mobile Networks. In *Proceedings of the 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 15–19 June 2020; P. 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148312>
15. Walter V., Staub N., Franchi A., Saska M. UVDAR System for Visual Relative Localization with Application to Leader-Follower Formations of Multirotor UAVs. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), 2019. P. 2637–2644. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2901683>
16. Bala J.A., Adeshina S.A., Aibinu A.M. Advances in Visual Simultaneous Localization and Mapping Techniques for Autonomous Vehicles: A Review. *Sensors*, 22(22), 2022. 8943 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228943>
17. Causa F., Vetrella A.R., Fasano G., Accardo D. Multi-UAV Formation Geometries for Cooperative Navigation in GNSS-Challenging Environments. In *Proceedings of the 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Monterey, CA, USA, 23–26 April 2018; P. 775–785. DOI: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373434>
18. Kaleem Z., Ahmad I., Duong T.Q. UAVs Path Planning by Particle Swarm Optimization Based on Visual-SLAM Algorithm. *Springer: Singapore*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-12924-7>

19. Nguyen T.H., Nguyen T.M., Xie L. Flexible and Resource-Efficient Multi-Robot Collaborative Visual-Inertial-Range Localization. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 2021. P. 928–935. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3136286>
20. Bala J.A., Adeshina S.A., Aibinu A.M. A Modified Visual Simultaneous Localization and Mapping (V-SLAM) Technique for Road Scene Modelling. In *Proceedings of the 2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, Lagos, Nigeria, 5–7 April 2022; P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NIGERCON54645.2022.9803124>
21. Wang D., Lian B., Liu Y., Gao B. A Cooperative UAV Swarm Localization Algorithm Based on Probabilistic Data Association for Visual Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 22(22), P. 19635–19644. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3213324>
22. Hellaoui H., Chelli A., Bagaa M., Taleb T. UAV Communication Strategies in the Next Generation of Mobile Networks. In *Proceedings of the 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 15–19 June 2020; P. 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148312>
23. Yang T., Shen X.S. Mission-Critical Search and Rescue Networking Based on Multi-Agent Cooperative Communication. *Springer Singapore Pte. Limited*, Singapore, 2020. P. 55–76. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4412-5_5

References

1. Fu, Z., Mao, Y., He, D., Yu, J., Xie, G. (2019), "Secure Multi-UAV Collaborative Task Allocation". *IEEE Access*, 7, P. 35579–35587. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902221>
2. Yavuz, H.S., Goktas, H., Cevikalp, H., Saribas, H. (2020), "Optimal Task Allocation for Multiple UAVs". In *Proceedings of the 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 5–7 October 2020; P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302360>
3. Roberge, V., Tarbouchi, M., Labonté, G. (2013), "Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
4. Bai, W., Wu, X., Xie, Y., Wang, Y., Zhao, H., Chen, K., Li, Y., Hao, Y. (2018), "A Cooperative Route Planning Method for Multi-UAVs Based on the Fusion of Artificial Potential Field and B-spline Interpolation". In *Proceedings of the 2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan, China, 25–27 July 2018; P. 6733–6738. DOI: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8483665>
5. Wang, W., Lv, M., Ru, L., Lu, B., Hu, S., & Chang, X. (2022), "Multi-UAV Unbalanced Targets Coordinated Dynamic Task Allocation in Phases". *Aerospace*, 9(9), 491 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9090491>
6. Wang, X., Bai, Y., Sun, Z., et al. (2024), "Deep Reinforcement Learning-Based Air Combat Maneuver Decision-Making: Literature Review, Implementation Tutorial, and Future Direction". *Artificial Intelligence Review*, 57(1), P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10620-2>
7. Yavuz, H.S., Goktas, H., Cevikalp, H., & Saribas, H. (2020), "Optimal Task Allocation for Multiple UAVs". In *Proceedings of the 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Turkey, 5–7 October 2020; P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302360>
8. Roberge, V., Tarbouchi, M., & Labonté, G. (2013), "Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), P. 132–141. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2198665>
9. Jia, G.W., & Wang, J.F. (2021), "Research Review of UAV Swarm Mission Planning Method". *Systems Engineering and Electronics*, 43(1), P. 99–111.
10. Lizzio, F.F., Capello, E., Guglieri, G. (2022), "A Review of Consensus-Based Multi-Agent UAV Implementations". *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 106(2), 43 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01391-5>
11. Ammoniaci, M., Kartsiotis, S., Perria, R., Storchi, P. (2021), "State of the Art of Monitoring Technologies and Data Processing for Precision Viticulture". *Agriculture*, 11(3), 201 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11030201>
12. Yang, T., Shen, X.S. (2020), "Mission-Critical Search and Rescue Networking Based on Multi-Agent Cooperative Communication". *Springer Singapore Pte. Limited: Singapore*; P. 55–76. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4412-5_5
13. Koushik, A.M., Hu, F., & Kumar, S. (2019), "Deep-Learning-Based Node Positioning for Throughput-Optimal Communications in Dynamic UAV Swarm Network". *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 5(3), P. 554–566. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCCN.2019.2907520>
14. Hellaoui, H., Chelli, A., Bagaa, M., Taleb, T. (2020), "UAV Communication Strategies in the Next Generation of Mobile Networks". In *Proceedings of the 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 15–19 June 2020; P. 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148312>
15. Walter, V., Staub, N., Franchi, A., Saska, M. (2019), "UVDAR System for Visual Relative Localization with Application to Leader-Follower Formations of Multirotor UAVs". *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), P. 2637–2644. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2901683>
16. Bala, J.A., Adeshina, S.A., Aibinu, A.M. (2022), "Advances in Visual Simultaneous Localization and Mapping Techniques for Autonomous Vehicles: A Review". *Sensors*, 22(22), 8943 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228943>

17. Causa, F., Vetrella, A.R., Fasano, G., Accardo, D. (2018), "Multi-UAV Formation Geometries for Cooperative Navigation in GNSS-Challenging Environments". In *Proceedings of the 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Monterey, CA, USA, 23–26 April 2018; P. 775–785. DOI: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373434>
18. Kaleem, Z., Ahmad, I., & Duong, T.Q. (2022), "UAVs Path Planning by Particle Swarm Optimization Based on Visual-SLAM Algorithm". *Springer: Singapore*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-12924-7>
19. Nguyen, T.H., Nguyen, T.M., & Xie, L. (2021), "Flexible and Resource-Efficient Multi-Robot Collaborative Visual-Inertial-Range Localization". *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), P. 928–935. DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3136286>
20. Bala, J.A., Adeshina, S.A., Aibinu, A.M. (2022), "A Modified Visual Simultaneous Localization and Mapping (V-SLAM) Technique for Road Scene Modelling". In *Proceedings of the 2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, Lagos, Nigeria, 5–7 April 2022; pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/NIGERCON54645.2022.9803124>
21. Wang, D., Lian, B., Liu, Y., & Gao, B. (2022), "A Cooperative UAV Swarm Localization Algorithm Based on Probabilistic Data Association for Visual Measurement". *IEEE Sensors Journal*, 22(22), P. 19635–19644. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3213324>
22. Hellaoui, H., Chelli, A., Bagaa, M., & Taleb, T. (2020), "UAV Communication Strategies in the Next Generation of Mobile Networks". In *Proceedings of the 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 15–19 June 2020; P. 1642–1647. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWCMC48107.2020.9148312>
23. Yang, T., Shen, X.S. (2020), "Mission-Critical Search and Rescue Networking Based on Multi-Agent Cooperative Communication". *Springer Singapore Pte. Limited, Singapore*, P. 55–76. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4412-5_5

Надійшла (Received) 01.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Калашнікова Василиса Ігорівна – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірантка кафедри інформаційних технологій проєктування, Харків, Україна; e-mail: v.kakashnikova@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1541-9635>

Kalashnikova Vasylysa – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M.E. Zhukovsky, PhD Student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

METHODS OF MANAGING AN AUTOMATED MOBILE SYSTEM

Subject matter: Description of existing management methods for an automated mobile system, particularly a swarm of bots.

Goal: To conduct a comparative analysis of centralized, decentralized, and distributed management methods to identify their advantages and disadvantages. **Tasks:** To study various approaches to managing a swarm of bots, analyze their efficiency, reliability, and applicability in different fields. **Methods:** Theoretical analysis of existing approaches, modeling, and simulation to assess their performance and reliability. The research includes the use of genetic algorithms, swarm algorithms, and artificial potential fields for managing bot trajectories. **Results:** The conducted analysis shows that centralized methods provide high accuracy and coordination but have limited fault tolerance and scalability. Decentralized methods offer greater flexibility and robustness but may have coordination issues between nodes. Distributed methods provide high autonomy and adaptability but require a reliable communication infrastructure. Genetic algorithms and swarm algorithms are effective for planning bot trajectories but have high computational costs. **Conclusions:** The use of different management methods depends on the specific requirements and conditions of the task. Centralized methods are suitable for tasks where precision and coordination are important, decentralized methods for tasks requiring flexibility and robustness, and distributed methods for tasks needing autonomy and adaptability. Future research should focus on integrating different approaches to enhance the efficiency and reliability of bot swarm management systems.

Keywords: automated system; management; bots; performance; reliability; genetic algorithms; swarm algorithms; centralized management; decentralized management; distributed management.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Калашнікова В. І. Аналіз та моделювання методів управління роєм безпілотних літальних апаратів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 67–84. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.067>

Kalashnikova, V. (2024), "Methods of managing an automated mobile system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 67–84. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.067>

О. ЛЯШЕНКО, М. СТАРОДУБЦЕВ, Г. МАКАРЕНКО, О. ПАЩЕНКО

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЙ

Предметом дослідження є метод керування швидкістю асинхронного двигуна, увімкненого за схемою асинхронно-вентильного каскаду, що підвищує коефіцієнт потужності привода й позитивно впливає на енергосистему загалом. **Мета роботи** – розроблення та дослідження методів керування електромеханічними системами на базі асинхронного електропривода, що забезпечують високоефективну роботу реалізованих на їх основі конвеєрних ліній як елементів складного технологічного обладнання автоматизованої системи керування технологічними процесами. У статті виконуються такі **завдання**: аналіз задач керування конвеєрними лініями в межах інтегрованої автоматизованої системи управління технологічними процесами виробничих систем; розгляд виконавчих елементів електропривода конвеєрних ліній; розроблення методу регулювання швидкості асинхронного двигуна, увімкненого за схемою асинхронно-вентильного каскаду. **Методологія дослідження** ґрунтується на методах теорії електричних машин, теорії електропривода, чисельних і аналітичних методах розв'язання диференціальних рівнянь, теорії моделювання. **Результати роботи** передбачають метод керування швидкістю асинхронного двигуна, що ґрунтується на реалізації імпульсного керування, що виділяється можливістю підтримки кутів керування повністю керованими силовими напівпровідниковими елементами для досягнення високого значення коефіцієнта потужності та зміни частоти увімкнення силового елемента електронного ключа, що закорочує інвертор. Досліджено вплив тривалості відносної тривалості комутації ключа на характеристики виконавчого елемента. **Висновки**: застосування запропонованого методу імпульсного регулювання електропривода дає змогу розширити верхню межу регулювання швидкості, підвищити коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності електропривода, зменшити індуктивність згладжувального дроселя.

Ключові слова: роботизовані системи; транспортувальний шатл; конвеєрна лінія; автоматизоване керування; асинхронний двигун.

Вступ

Успішна робота сучасного підприємства ґрунтується на масовій автоматизації виробничих процесів, зокрема це стосується транспортування матеріалів, деталей та виробів [1–4].

Сучасні транспортні системи відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки виробничих процесів. Основні характеристики сучасних транспортних систем передбачають високу швидкість і точність руху, можливість автоматизації процесів та інтеграцію з іншими системами виробництва.

Однією з ключових тенденцій у розвитку транспортних систем є впровадження роботизованих транспортних систем, конвеєрних ліній, автономних виробничих роботів, транспортувальних шатлів і автоматизованих механізмів. Це дає змогу підвищити продуктивність, знизити витрати на персонал і забезпечити високу якість виробничих процесів.

Серед зазначених технічних засобів автоматизації для виконання транспортних завдань на виробництві та забезпечення внутрішньоскладських логістичних процесів ефективно застосовуються транспортні механізми безперервної дії, найбільш поширеними з яких є конвеєри.

Конвеєрні лінії є основним функціональним компонентом більшості сучасних технологічних процесів дискретного типу, вони забезпечують синхронізацію різноманітного технологічного устаткування. Це висуває підвищені вимоги як до енергетичних параметрів конвеєрних систем, так і до характеристик надійності. Ефективність роботи конвеєрних систем суттєво підвищується в разі застосування регульованого асинхронного електропривода (ЕП) за умов поліпшення енергетичних показників [5, 6]. Розроблення методів і систем високонадійного автоматизованого керування ЕП з огляду на особливості конвеєрних ліній дає змогу забезпечити належний рівень якості та надійності всієї конвеєрної системи завдяки поліпшенню енергетики виконавчих елементів і синхронізації їх роботи.

У зв'язку з цим проблема розроблення математичних моделей електромеханічних систем і методів керування електромеханічними системами на базі асинхронного електропривода, орієнтованими на реалізацію в межах конвеєрних ліній як елементів складного технологічного обладнання автоматизованої системи керування технологічними процесами (АСКТП), є актуальною.

1. Конвеєрні лінії в структурі АСКТП дискретного виробництва

Розвиток виробництва, зростання вимог до якості продукції та обсягу випуску зумовлюють упровадження сучасних технологій керування технологічними процесами. Автоматизована система керування технологічними процесами – сукупність апаратно-програмних засобів, що контролюють виробничі та технологічні процеси й керують ними, підтримують зворотний зв'язок і активно впливають на хід процесу за умови відхилення його від заданих параметрів, забезпечують регулювання та оптимізацію керованого процесу [7].

У структурі АСКТП виокремлюють п'ять рівнів ієрархії:

- 1) нижній (рівень локального керування) – рівень датчиків і виконавчих елементів;
- 2) середній (рівень керування процесом) – рівень мікропроцесорних контролерів;
- 3) зв'язковий (рівень керування виробничою ділянкою) – рівень промислових комп'ютерів-складальників;
- 4) оперативний (рівень керування виробництвом) – рівень операторських станцій;
- 5) адміністративний (рівень стратегічного керування) – рівень диспетчерських станцій.

Конвеєрні лінії розташовані на рівні датчиків і виконавчих елементів (нижньому рівні) ієрархічної структури АСКТП.

Основними класифікаційними ознаками конвеєра є тип тягового й вантажонесучого органів [8, 9]. Розрізняють конвеєри зі стрічковим, ланцюговим, канатним та іншими тяговими органами та конвеєри без тягового органа (гвинтові, інерційні, вібраційні, роликові). За типом вантажонесучого органа конвеєри можуть бути модульними стрічковими, стрічковими, пластинчастими, роликовими тощо.

Модульні стрічки конвеєрні – це тип конвеєрної стрічки, що містить окремі модулі, з'єднані між собою за допомогою шарнірних з'єднань або зчіпних елементів. Такі стрічки можуть бути виготовлені з різних матеріалів, зокрема пластику й металу, вони часто використовуються в промисловості для транспортування товарів і матеріалів. Модульна конструкція дає змогу легко замінювати окремі модулі в разі пошкодження, а також змінювати довжину стрічки або її конфігурацію відповідно до конкретних потреб виробництва. Основними

перевагами модульних стрічок є висока міцність, гнучкість, простота обслуговування та можливість адаптації до різних типів виробничих процесів.

Пластинчасті конвеєри – це тип конвеєрних систем, що застосовують жорсткі пластини, сполучені між собою ланцюговими або шарнірними з'єднаннями для створення суцільної рухомої поверхні. Пластини можуть бути виготовлені з металу, пластику або інших міцних матеріалів. Такі конвеєри часто застосовуються для транспортування важких вантажів.

Роликовий конвеєр – це тип конвеєрної системи, в якій транспортування вантажів здійснюється за допомогою обертових роликів, розташованих на рамі. Ролики можуть бути виготовлені з різних матеріалів, зокрема сталі, алюмінію, пластику, і встановлюються на певній відстані один від одного, утворюючи суцільну поверхню для переміщення вантажів.

Стрічковий конвеєр – це тип конвеєрної системи, що використовує безперервну стрічку для транспортування матеріалів або вантажів з одного місця в інше. Стрічка зазвичай виготовлена з гуми, ПВХ, поліуретану або інших міцних матеріалів і натягнута між двома або більше шківками, з яких один або кілька можуть бути приводними.

Отже, конвеєри є невід'ємною частиною сучасного технологічного процесу, вони встановлюють та регулюють темп виробництва, забезпечують його ритмічність, сприяють підвищенню продуктивності праці та збільшенню випуску продукції. Тісний зв'язок транспортувальних машин із загальним технологічним процесом виробництва зумовлюють високу відповідальність їх роботи та призначення. Тому конвеєри мають бути надійними, зручними в експлуатації та здатними працювати в автоматичних режимах [10].

Особливі вимоги висуваються до надійності роботи окремих конвеєрів та конвеєрних ліній загалом [11–13]. Ця вимога посилюється ще й тим, що конвеєрні лінії, як правило, належать до систем, які не резервуються, оскільки установка резервної конвеєрної лінії настільки підвищує капітальні витрати, що конвеєрне транспортування, на відміну від інших видів, за інших рівних умов у деяких випадках стає менш рентабельним.

До основних факторів, що впливають на надійність роботи стрічкових конвеєрів, належить можливість розриву стрічки та її коливання, зумовлені пружністю [14], а також відмова електрообладнання та систем керування.

Зважаючи на сказане вище, можна зробити висновок, що надійна робота АСКТП дискретного виробництва залежить від роботи всіх рівнів ієрархії та насамперед від нижнього й середнього рівнів, тобто від конвеєрної лінії та її системи керування.

2. Аналіз виконавчих елементів конвеєрних ліній

Основним призначенням привода стрічкового конвеєра є забезпечення передачі необхідного тягового зусилля та нормального руху конвеєрної стрічки за всіх режимів роботи.

Для стрічкових конвеєрів найбільшого поширення набув привод з асинхронним двигуном (АД) з фазним ротором [15–17]. Цей пристрій забезпечує оптимальний пуск із заданим прискоренням і тривалістю розгону конвеєрної стрічки. У такому приводі легко здійснювати заданий розподіл тягового зусилля між приводними барабанами.

У разі зміни напруги, що підводиться до статора короткозамкненого АД (тобто в процесі фазового керування), статор під'єднується до мережі за допомогою зустрічно-паралельних тиристорів, що можуть не тільки виконувати функції ключа, але й змінювати діюче значення прикладеної до двигуна напруги у функції відпираючого кута тиристорів. Система фазового керування забезпечує плавний пуск конвеєра, рух стрічки зі зниженою швидкістю, плавний перехід із однієї швидкості на іншу.

Для стрічкових конвеєрів зазвичай використовують дві принципові схеми регульованого електропривода змінного струму з частотним перетворювачем: схему з безпосереднім під'єднанням короткозамкненого АД до перетворювача, під'єданого до мережі живлення, і схему з проміжною ланкою постійного струму. Друга схема забезпечує регулювання частоти в ширшому діапазоні і, отже, більш плавну зміну швидкості руху конвеєрної стрічки. Частота струму змінюється за допомогою подання імпульсів із різною частотою на тиристори інвертора. Система керування в певній послідовності відпирає тиристори, у цьому разі до фаз статора АД підводяться напруги, зсунуті по фазах на 120° .

Пос'єднання регулювання напруги, що підводиться до АД, зі зміною частоти струму дає змогу отримати сімейство регульовальних характеристик.

Основні переваги приводів із частотними перетворювачами такі:

– можливість використання короткозамкнених АД для приводів будь-якої потужності;

– у процесі регулювання швидкості неможливі витрати в реостатах, що підвищує економічність приводу;

– під час пуску АД постійно працює в межах робочої частини характеристики, до того ж кратність пускових струмів знижується до 2–3 замість 5–7;

– з'являється можливість здійснення регульованого пуску з необхідним ступенем плавності;

– забезпечується стабільне та економічне регулювання швидкості в режимі без витрат на ковзання.

Електропривод за схемою асинхронно-вентильного каскаду (АВК) є системою регульованого електропривода змінного струму, що містить АД з фазним ротором, каскадно з'єднаним з іншими електричними машинами або статичними перетворювачами [18, 19].

Перетворювач АВК містить випрямляч, з'єднаний з контактними кільцями ротора двигуна, та інвертора, що перетворює постійний струм у змінний, який крізь узгоджувальний трансформатор надходить у мережу.

Механічні характеристики АД у приводі за схемою АВК мають досить високу жорсткість і за умови зміни імпульсів, що управляють, переміщуються майже паралельно вздовж осі ординат. Якщо енергія ковзання перевищує витрати в обмотці ротора двигуна, а також у силових вентилях і тиристорах, відбувається її рекуперація в мережу, що покращує енергетичні показники привода.

Переваги електропривода за схемою АВК:

– під'єднання статора приводного двигуна безпосередньо до мережі без проміжного перетворювача;

– простий і надійний виконавчий двигун, що не потребує значних витрат щодо догляду;

– в аварійних режимах є можливість переходу на роботу без перетворювача;

– статичні елементи використовуються у вторинному ланцюзі без безпосереднього їх приєднання до джерела електричної енергії;

– одинична потужність і максимальна частота обертання обмежується потужністю та частотою обертання АД;

– можливість плавного регулювання частоти обертання та моменту;

– невелика потужність кіл керування;

– простота увімкнення до замкнутих систем регулювання;

– порівняно невелика потужність перетворювача, особливо в разі обмеженого діапазону регулювання;

– високий коефіцієнт корисної дії (ККД) системи завдяки рекуперації енергії ковзання в мережу.

Основним недоліком привода цього типу є низький (що залежить від глибини регулювання швидкості) коефіцієнт потужності та зниження ККД у разі зміни моменту навантаження і ковзання.

Зважаючи, що для ЕП конвеєра властивий невеликий діапазон регулювання (приблизно 10% зміни швидкості) [19], то вибір АВК як виконавчого елемента є найбільш доцільним. Так, з одного боку, за умови такого діапазону регулювання ККД АВК зберігає високе значення, а, з іншого боку, привод на базі АВК дешевший, якщо порівнювати з іншими типами регульованого асинхронного електропривода.

3. Імпульсне керування асинхронним двигуном асинхронного вентиляльного каскаду

Розвиток напівпровідникової техніки дає змогу розглянути питання застосування імпульсного методу регулювання швидкості АД з фазним ротором [20]. У застосуванні цього методу керування можна регулювати швидкість у досить широких межах та отримувати необхідні механічні характеристики.

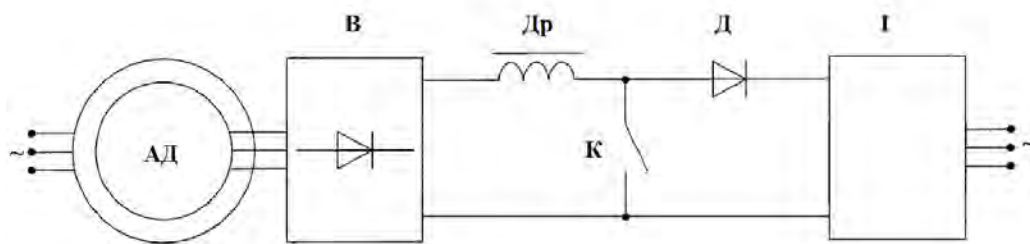


Рис. 1. Схема імпульсного керування АД АВК

Регулювання в подібних схемах здійснюється зміною відносної тривалості увімкнення, яка дорівнює:

$$\gamma = \frac{T - t_u}{T}, \quad (1)$$

де T – період повторення імпульсів; t_u – тривалість імпульсу, що відповідає часу вимкненого стану електронного ключа.

За умови імпульсного регулювання швидкості АД з фазним ротором доцільно застосовувати закон комутації з постійним часом вимкненого стану силового елемента ключа та змінною частотою [20]. Для такого закону комутації властиво $t_u = \text{const}$. Параметром системи в цьому разі є величина

$$\alpha = t_u / T_2, \quad (2)$$

де T_2 – постійна часу протягом другого інтервалу комутації.

Його значною перевагою є простота схем керування, швидкодія.

Принцип побудови систем з імпульсним регулюванням полягає в тому, що в роторне коло постійного струму (рис. 1) паралельно до перетворювального пристрою (I) встановлюється електронний ключ (K). Така схема дає змогу внаслідок зміни відносної тривалості увімкнення ключа регулювати швидкість обертання двигуна. Випрямляч (B) зібраний за трифазною мостовою схемою; згладжувальний дросель ($Др$), зменшує пульсації струму. Щоб уникнути коротке замикання перетворювача, в його коло увімкнений захисний діод D .

Застосування імпульсного керування допомагає знизити габаритну потужність перетворювальних пристроїв і особливо доцільне в приводах із вентиляним навантаженням, для яких потужність перетворювача за будь-якого діапазону регулювання буде незначною [20]. Необхідно зауважити, що перетворювач може використовуватися для поліпшення загального коефіцієнта потужності й бути спільним для кількох каскадів.

Величина α має обиратися залежно від допустимого значення витрат і пульсацій у роторному колі постійного струму. У системах зі змінною частотою комутації витрати перемикання зменшуються пропорційно до зростання відносної тривалості увімкнення. Найбільш важким режимом роботи силових елементів за умови цього закону комутації є режим, що відповідає максимальній частоті комутації (тобто мінімальній швидкості обертання двигуна) та найбільшому навантаженню.

Схема заміщення системи в процесі імпульсного керування зображена на рис. 2.

Рівняння, що визначають роботу поданої схеми за умови довільного ковзання s АД, мають вигляд:

1) ключ замкнуто $0 \leq t \leq \gamma T$:

$$i + T_1 \frac{di}{dt} = I'; \quad (3)$$

2) ключ розімкнуто $\gamma T \leq t \leq T$:

$$i + T_2 \frac{di}{dt} = I'', \quad (4)$$

де I' – граничне значення струму в разі заданого ковзання та $\gamma = 1$; I'' – граничне значення струму за умови заданого ковзання і $\gamma = 0$; T_1 – постійна часу кола впродовж першого інтервалу комутації; T_2 – постійна часу кола протягом другого інтервалу комутації.

Граничні значення струмів I' і I'' та постійні часу T_1 та T_2 визначаються таким чином:

$$I' = \frac{Es - \Delta U}{R_e s + R}, \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{L}{R_e s + R}, \quad (6)$$

$$I'' = \frac{Es - \Delta U - E_u}{R_e s + R + R_u}, \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{L}{R_e s + R + R_u}, \quad (8)$$

де R_e – еквівалентний омичний опір, що враховує зниження внутрішньої електрорушійної сили (ЕРС) внаслідок перекриття вентилів; R – активний опір двох фаз обмотки ротора; L – індуктивність реактора та індуктивність розсіювання двох фаз АД; E_u – проти-ЕРС інвертора; R_u – еквівалентний омичний опір; ΔU – пряме падіння напруги на захисному діоді та силовому елементі ключа.

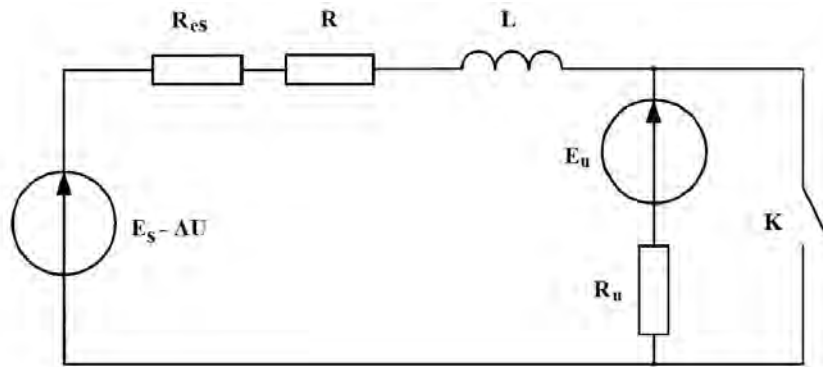


Рис. 2. Схема заміщення

Вираз для розмаху пульсацій струму в сталому режимі:

$$\Delta I = \frac{(I' - I'')(1 - e^{-\alpha\tau/(1-\gamma)})(1 - e^{-\alpha})}{1 - e^{-\alpha} \cdot e^{-\alpha\tau/(1-\gamma)}}, \quad (9)$$

де $\tau = T_2/T_1$, $\tau \leq 1$. (10)

Середнє значення струму в сталому режимі

$$I_{cp} = I'\gamma + I''(1-\gamma) - \Delta I \frac{(1-\gamma)(1-\tau)}{\alpha\tau}. \quad (11)$$

Пульсації струму максимальні за умови найбільшої γ і залежать від α, τ . Розкладаючи вираз для ΔI в ряд Тейлора та обмежуючись першими двома членами, що цілком допустимо за малих α , отримуємо для середнього значення струму

$$I_{cp} = \left(I'\gamma + \frac{I''}{\tau}(1-\gamma) \right) / \left(\gamma + \frac{1}{\tau}(1-\gamma) \right). \quad (12)$$

Вираз для розмаху пульсацій можна переписати так:

$$\frac{\Delta I}{I_{cp}} = \frac{[(Es - \Delta U)(1-\tau) + \tau E_u]\gamma\alpha}{Es - \Delta U - E_u(1-\gamma)}. \quad (13)$$

Якщо $\alpha < 0,1$, енергетичні показники імпульсної схеми практично не відрізняються від схем з безперервним керуванням [20].

Виразу (12) для середнього значення струму можна надати вигляду

$$I_{cp} = \frac{Es - \Delta U + E_u(1-\gamma)}{R_e s + R + R_u(1-\gamma)}. \quad (14)$$

Рівняння швидкісної характеристики $n = f(I_{cp})$

для АД з імпульсним регулюванням:

$$s = \frac{(E_u + I_{cp}R_u)(1-\gamma) + \Delta U + I_{cp}R}{E - I_{cp}R_e} \quad (15)$$

або

$$n = n_0 \left[1 - \frac{(E_u + I_{cp}R_u)(1-\gamma) + \Delta U + I_{cp}R}{E - I_{cp}R_e} \right], \quad (16)$$

де n_0 – швидкість ідеального холостого ходу; n – поточне значення швидкості обертання ротора.

Звідси випливає, що n пропорційно γ , тобто зміною γ – відносної тривалості увімкнення –

ми, відповідно, змінюємо швидкість обертання АД із фазним ротором. Робота на більшій швидкості досягається збільшенням відносної тривалості увімкнення ключа. Якщо $\gamma \rightarrow 1$, швидкісна характеристика наближається до природної. Нижня межа регулювання швидкості за умови $\gamma \rightarrow 0$ визначається внутрішньою ЕРС перетворювача; жорсткість швидкісних характеристик у разі малих γ погіршується. Якщо $R_u = 0$, характеристики паралельні одна одній. Діапазон регулювання швидкості за певних E_u , R_u залежить від зміни γ . За умови довільних відносних тривалостей ($0 < \gamma < 1$) ключ дає змогу наче плавно змінювати значення проти-ЕРС інвертора, що вводиться в коло ротора, від величини E_u до 0. Зазвичай для отримання верхньої та нижньої меж регулювання достатньо мати γ , відповідно, 0,95 і 0,05, тому що в цьому разі властивості практично збігаються з граничними характеристиками, якщо $\gamma = 1$ і $\gamma = 0$.

Залежність моменту АД від середнього значення струму випрямленого кола визначається так:

$$M = \frac{1}{\omega_0} E I_{cp} \left(1 - \frac{I_{cp} R_e}{E} \right), \quad (17)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість ротора.

За допомогою формул (16) і (17) можна побудувати швидкісні та механічні характеристики АД за незмінної величини γ (рис. 3). У процесі імпульсного регулювання швидкості АД може працювати в тих самих режимах, що й звичайний каскад [20].

За умови імпульсного регулювання швидкості АД із фазним ротором за малих навантажень у роторному колі можливий режим переривчастих струмів.

У приграничній точці між безперервним і переривчастими режимами мінімальне значення струму періодичного процесу, що встановився, обертається в нуль.

Для середнього значення струму можна отримати такий вираз:

$$I_{cp} = I' \gamma + I'' (1 - \gamma) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \tau)}{\alpha \tau} (1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)}) I'. \quad (18)$$

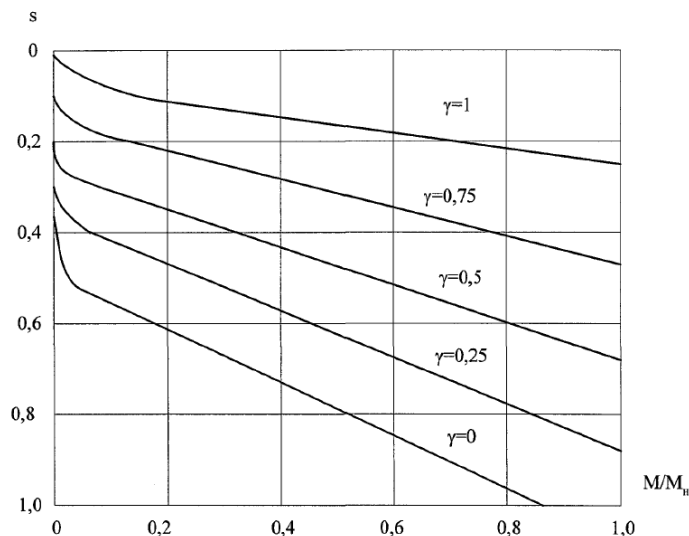


Рис. 3. Механічні характеристики АВК за умови імпульсного регулювання

Залежність моменту АД від середнього значення струму визначається за такою формулою:

$$M_{cp} = \frac{I_{cp} E}{\omega_0}. \quad (19)$$

Ковзання у відносних одиницях:

$$\varphi = 1 / \left(1 + \frac{1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)}}{(e^\alpha - 1) \tau} \right); \quad (20)$$

$$M = \varphi \left[\tau + \gamma (1 - \tau) - \frac{(1 - \gamma)(1 - \tau)(1 - e^{-\alpha \tau / (1 - \gamma)})}{\alpha \tau} \right] - \tau (1 - \gamma), \quad (21)$$

де ковзання у відносних одиницях:

$$\varphi = (Es - \Delta U) / E_u ; \quad (22)$$

значення моменту двигуна у відносних одиницях:

$$M = \frac{M_{cp} R \omega_0}{EE_u}. \quad (23)$$

Рівняння (20) спільно з рівнянням (21) дає змогу визначити криві на площині φ , M , що обмежують ділянку безперервного струму. Якщо застосовувати наведені вирази, легко побудувати механічні характеристики в ділянці безперервного (за малих навантажень) і переривчастого струму.

Унаслідок розкладання експоненціальних членів у степеневий ряд отримаємо наближені рівняння для побудови механічних характеристик у ділянці переривчастих струмів:

$$\varphi_n = \varphi \frac{1 - \gamma_n}{1 - \gamma}, \quad (24)$$

$$M_n = (\varphi_n - 1 + \gamma_n) \tau, \quad (25)$$

де φ – ковзання у відносних одиницях на граничній кривій за умови заданих α , τ , γ .

У разі імпульсного регулювання швидкості АД значення коефіцієнта τ перебуває зазвичай

у межах 0,5–1,0; значення параметра α завжди можна отримати меншим ніж 0,4.

На рис. 4 наведена діаграма залежності φ від M для різних значень α (якщо $\tau = 1$), побудована за рівняннями:

$$\varphi = \frac{1 - e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha/(1-\gamma)}}, \quad (26)$$

$$M = \varphi - 1 + \gamma. \quad (27)$$

Ліворуч від граничних кривих розташована ділянка переривчастого струму, праворуч – безперервного. На рис. 4 також побудовано механічні характеристики за умови $\alpha = 0,2$. Якщо $\tau = 1$, властивості близькі до прямолінійних, у разі $\tau < 1$ чіткіше спостерігається нелінійність механічних характеристик. У ділянці переривчастих струмів механічні характеристики мають значну крутість (особливо якщо малі γ).

Знаючи межі зміни моменту навантаження і користуючись наведеними виразами, можемо знайти необхідне значення параметра α , за якого двигун працює в режимі безперервного струму. Якщо $\alpha < 0,05$, режим переривчастих струмів практично вимикається [20].

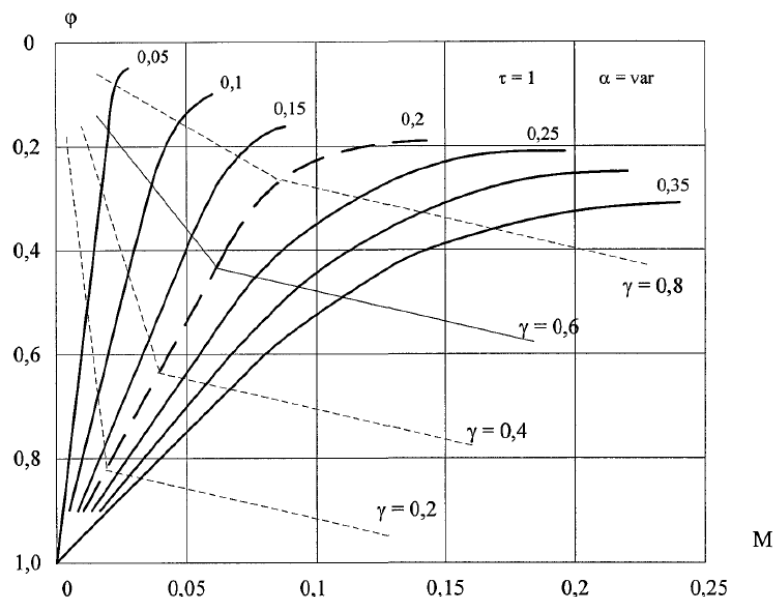


Рис. 4. Діаграма залежності φ від M за умови $\tau = 1$ та $\alpha = \text{var}$

Найбільш істотним недоліком асинхронного вентиляного каскаду, де регулювання здійснюється зміною кута випередження веденого інвертора, є низький коефіцієнт потужності.

Визначимо коефіцієнт спотворення та потужність спотворення інвертора. У процесі імпульсного

регулювання АД в інвертор надходять імпульси струму тривалістю t_u , які прямують один за одним через період T повторення імпульсів.

Діюче значення основної гармоніки струму мережної обмотки визначається як:

$$i_{1u} = \frac{2\sqrt{2}I_1 \sin(t_u/2)}{k_t \pi} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}, \quad (28)$$

де k_t – коефіцієнт трансформації; I_1 – струм у вентильній обмотці трансформатора.

Діюче значення струму мережної обмотки визначається за формулою

$$i_{\partial u} = I_{1u} \sqrt{2t_u/3T}, \quad (29)$$

де

$$I_{1u} = I_1/k_t. \quad (30)$$

$$P_{uv} = 3U_1 I_{1u} \sqrt{\frac{2t_u}{3T} - \frac{4(1-\cos t_u)}{\pi^2}} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}, \quad (32)$$

де U_1 – діюче значення фазової напруги мережі.

Потужність спотворення звичайного інвертора (кут перекриття вентилів не беремо до уваги) можна отримати з (32) за умови $t_u = T = 2\pi/3$:

$$P'_{uv} = 3U_1 I_{1u} \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}}. \quad (33)$$

Отже, потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, виходить найменшою за великих γ , незважаючи на низький k_u ; потужність спотворення особливо збільшується на середніх швидкостях, а за умови $\gamma \rightarrow 0$ наближається до потужності спотворення звичайного інвертора.

Коефіцієнт спотворення в цьому разі дорівнює

$$k_u = \frac{2\sqrt{3}T \sin \frac{t_u}{2}}{\pi \sqrt{t_u}} \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (31)$$

Потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, з огляду на вирази (28) та (29) дорівнює

Потужність спотворення інвертора, що працює в імпульсному режимі, залежить від навантаження на валу двигуна та коефіцієнта трансформації; у приводах малої та середньої потужності з вентильним навантаженням і невеликим діапазоном регулювання потужність спотворення буде незначною і не зможе помітно негативно впливати на мережу.

Кут зсуву фаз між основною гармонікою та напругою інвертора (рис. 5) дорівнює

$$\varphi_u = \beta + \psi_u, \quad (34)$$

де β – кут випередження інвертора; ψ_u – кут зсуву першої гармоніки щодо середини паузи фазового струму звичайного інвертора.

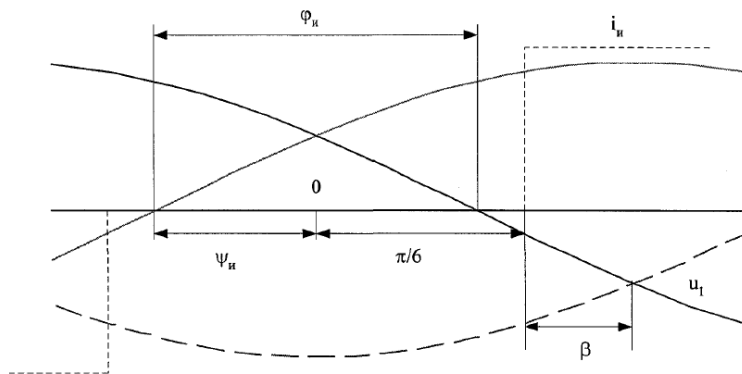


Рис. 5. Кут зсуву фаз

Активна потужність, що віддається інвертором у трифазну мережу, визначається активним складником

$$P_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (35)$$

Реактивна потужність

$$Q_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT\right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT\right)^2}. \quad (36)$$

основної гармоніки струму мережної обмотки й за умови синусоїдальної первинної напруги дорівнює

$$P_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2}. \quad (35)$$

Реактивна потужність

$$Q_u = \frac{6}{\pi k_t} \sqrt{2} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2}. \quad (36)$$

Реактивна потужність звичайного інвертора з (36), якщо $t_u = \frac{2\pi}{3}$, дорівнює

$$Q_u' = \frac{6\sqrt{3}/2}{\pi k_t} U_1 I_1 \sin \frac{t_u}{2} \sin \beta'. \quad (37)$$

Відомо, що у звичайному вентильному каскаді коефіцієнт потужності виявляється низьким. Інвертор повертає активну потужність у мережу, тому активні потужності двигуна та інвертора віднімаються, а їх реактивні потужності складаються. У процесі роботи на високих швидкостях потужність звичайного інвертора майже повністю реактивна. Набагато меншою

буде реактивна потужність, що споживається інвертором під час імпульсного керування. Наприклад, найбільша реактивна потужність інвертора, що працює в імпульсному режимі, виходить приблизно в 25 разів меншою за реактивну потужність, що споживається звичайним інвертором.

Повна потужність обчислюється за формулою

$$S_u = \frac{3}{k_t} U_1 I_1 \sqrt{\frac{2t_u}{3T}}. \quad (38)$$

Відповідно до (35) і (38), що визначають активну та повну потужність інвертора, знаходимо власний коефіцієнт потужності інвертора:

$$\cos \varphi_u = \frac{2\sqrt{3}T}{\pi \sqrt{t_u}} \sin \frac{t_u}{2} \cos(\beta + \psi_u) \sqrt{\left(\sum_{m=1}^{m=n'} \sin mT \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{m=n'} \cos mT \right)^2} \quad (39)$$

або

$$\cos \varphi_u = k_u \cos(\beta + \psi_u). \quad (40)$$

Значні можливості для зниження енерговитрат і поліпшення енергетичних показників перетворювача властиві методу штучної комутації тиристорів [21]. За малих γ , незважаючи на деяке погіршення коефіцієнта спотворення, і за негативних значень кута β з боку змінного струму інвертора можна отримати випереджальний коефіцієнт потужності. У цьому разі для підвищення надійності необхідно, щоб інвертор мав схему штучної комутації; тут дуже перспективне застосування повністю керованих кремнієвих вентилів.

Керування перетворювачами зі штучною комутацією можливе в ділянці випереджальних кутів $(-\pi \leq \beta \leq 0)$, що перетворює ці пристрої зі споживачів в генератори реактивної потужності ємнісного характеру (компенсаційні перетворювачі).

Останній етап у розвитку перетворювачів зі штучною комутацією ознаменувався появою глибокорегульованих пристроїв, властивості яких роблять можливим їх застосування в широкій сфері техніки. Принципи побудови та керування перетворювачів із штучною комутацією можуть бути перенесені на ділянку перетворювальних схем, виконуваних на повністю керованих приладах, які на

цей час бурхливими темпами впроваджуються у сфері силової перетворювальної техніки [22].

До сучасних відомих і освоєних промисловістю силових напівпровідникових приладів цього типу належать: запірний тиристор (GTO), біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT), запірний тиристор із вбудованою системою керування (IGCT) та їх модифікації.

Для GTO властиві такі переваги: здатність до керованого запирання; порівняно висока переважувальна здатність; можливість послідовного з'єднання; робочі частоти до 250 Гц за умови напруги до 4 кВ. Недоліки: високі витрати в увімкненому стані; дуже значні витрати в системі керування; складні системи керування та подання енергії на потенціал; високі витрати на перемикання.

Переваги IGBT: здатність до керованого запирання; найвища робоча частота (до 10 кГц); проста неенергоємна система керування; вбудований драйвер. Недоліки: дуже високі витрати в увімкненому стані.

Переваги IGCT: здатність до керованого запирання; переважувальна здатність та сама, що й у GTO; низькі витрати в увімкненому стані на перемикання; робоча частота – до одиниць кГц; вбудований блок керування (драйвер); можливість послідовного з'єднання. Недоліки: не виявлено через відсутність тривалого досвіду експлуатації.

За виразами, що визначають активну й реактивну потужності спотворення двигуна та інвертора, знаходимо коефіцієнт потужності АВК:

$$\cos \varphi_{ABK} = \frac{P_a - P_u}{\sqrt{(P_a - P_u)^2 + (Q - Q_u)^2 + (P_v - P_{uv})^2}} \quad (41)$$

За великих γ коефіцієнт потужності за умови імпульсного регулювання практично визначається власним коефіцієнтом потужності АД.

Висновки

У процесі дослідження проаналізовано підходи до керування електроприводом, що використовується як виконавчий елемент конвеєрних ліній. Визначено, що ефективність роботи конвеєрних систем суттєво підвищується за умови застосування регульованого електропривода на базі асинхронного двигуна з фазним ротором за схемою АВК. Цей пристрій забезпечує оптимальні режими роботи конвеєрної лінії, має високе значення ККД, і до того ж привод

на базі АВК дешевший порівняно з іншими типами регульованого асинхронного електропривода.

Запропоновано метод регулювання АД АВК, що оснований на імпульсному керуванні та дає змогу регулювати швидкість обертання за допомогою зміни частоти комутації електронного ключа, що закорочує інвертор, і водночас установлювати кути керування повністю керованими силовими елементами інвертора за умови їх штучної комутації для підтримки необхідного коефіцієнта зсуву. Це сприяє досягненню високого коефіцієнта потужності. Крім того, можливість використання одного інвертора для декількох виконавчих елементів знижує енерговитрати на привод.

Перспективи подальшого розвитку

У подальших дослідженнях планується здійснити аналіз і синтез системи автоматичного керування електроприводом конвеєрної лінії з огляду на збурювальні впливи й демпфування механічних коливань стрічки конвеєра.

Список літератури

1. Dunn William C. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. McGraw-Hill Book Co, 2018. 336 p. URL: <https://www.ebooks.com/en-us/book/96278766/fundamentals-of-industrial-instrumentation-and-process-control-2e-pb/william-c-dunn/>
2. Кишенько В. Д. Сучасні методи та моделі інтелектуальних систем керування. Київ: НУХТ, 2021. 252 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YHidYjIMnPI6Exx58-lg4j7vYzYc0As3/view>
3. Автоматизація виробничих процесів / І. В. Ельперін та ін. Київ: Ліпа-К, 2017. 378 с. URL: <https://pupenasan.github.io/avpbook/>
4. Nevliudov I. Evolutions Of Group Management Development Of Mobile Robotic Platforms In Warehousing 4.0. / I. Nevliudov et al. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2021. № 4 (18). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>
5. Dinolova P. Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations / P. Dinolova et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, 7136. 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16207136>
6. Sengamalai U. Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes. / U. Sengamalai et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, 8260. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218260>
7. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами. Київ: Гельветика, 2022. 324 с. URL: https://knushop.com.ua/faculty/kibernetika?product_id=2317&sort=p.model&order=ASC
8. Турушин В. О., Федорченко В. В. Машини промислового транспорту безперервної дії. Луганськ: ЧНУ ім. В. Даля, 2009. 134 с. URL: <https://www.twirpx.com>
9. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації / І. Ш. Невлюдов та ін. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. 450 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/d9c8323a-0bca-44ed-83cb-f785872b19cb>
10. Diachenko O. An overview of the constructions of conveyors for moving bulk materials, comparison and study of their parameters / Diachenko O. et al. *Mining, Constructional, Road and Melioration Machines*. 2024. No. 103. P. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdtmm.2024.103.0301>
11. Бондарев В. С. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підймальних і транспортувальних машин / В. С. Бондарев та ін. Київ: Вища шк., 2009. 734 с. URL: <https://f.eruditor.link/file/371876/>
12. Yevsieiev V. Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support / V. Yevsieiev et al. *Applied Mathematics & Information Sciences An International Journal*. 2023. Vol. 17, No. 6. P. 1073–1088. DOI: <https://doi.org/10.18576/amis/170615>
13. Nevliudov I. The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line / I. Nevliudov et al. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2024. No. 1 (27). P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>
14. Bortnowski P. Types and causes of damage to the conveyor belt-review, classification and mutual relations / P. Bortnowski et al. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Volume 140. 106520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>
15. Лавріненко Ю. М. Основи електропривода / Ю. М. Лавріненко та ін. Київ: Ліпа-К, 2017. 524 с. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Lavrin_2009_504.pdf

20. Голодний І. М., Санченко О. В. Регульований асинхронний електропривод вентиляційної системи з широтно-імпульсним керуванням. Київ: ЦП "Компринт", 2020. 117 с. URL: <http://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/5617/1/Monographia%20Golodniy%D0%B9%202020.pdf>
21. Сенько В. І., Трубіщин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ: Ліра-К, 2020. 300 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054410.pdf>
22. Регульований електропривод / І. М. Голодний та ін. Київ: ЦП "Компринт", 2015. 509 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektroprivod.pdf>

References

1. Dunn, W. (2018), "Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control", McGraw-Hill Book Co, 336 p. available at: <https://www.ebooks.com/en-us/book/96278766/fundamentals-of-industrial-instrumentation-and-process-control-2e-pb/william-c-dunn/>
2. Kyshenko, V. (2021), "Modern methods and models of intelligent control systems" ["Suchasni metody ta modeli intelektualnykh system keruvannia"], NUKhT, Kyiv, 252 p. available at: <https://drive.google.com/file/d/1YHidYjIMnPl6Exx58-lg4j7vYzYc0As3/view>
3. Elperin, I., Pupena, O., Sidletskyi, V., Shved, S. (2017), "Automation of production processes" ["Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv"], Lira-K, Kyiv, 378 p. available at: <https://pupenasan.github.io/avpbook/>
4. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Klymenko, O., Demska, N., Vzhesnievskyi, M. (2021), "Evolutions of Group Management Development of Mobile Robotic Platforms in Warehousing 4.0", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, № 4 (18), P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.057>
5. Dinolova, P., Ruseva, V., Dinolov, O. (2023), "Energy Efficiency of Induction Motor Drives: State of the Art, Analysis and Recommendations", *Energies*, Vol. 16, 7136, 26 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16207136>
6. Sengamalai, U., Anbazhagan, G., Thamizh Thentral, T.M., Vishnuram, P., Khurshaid, T., Kamel, S. (2022), "Three Phase Induction Motor Drive: A Systematic Review on Dynamic Modeling, Parameter Estimation, and Control Schemes", *Energies*, Vol. 15, 8260, 39 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218260>
7. Yermieiev, I., Kyselov, V. (2022), "Automated control systems of technological processes" ["Avtomatyzovani systemy upravlinnia tekhnolohichnymy protsesamy"], Vydavnychiy dim "Helvetyka", Kyiv, 324 p. available at: https://knushop.com.ua/faculty/kibernetika?product_id=2317&sort=p.model&order=ASC
8. Turushyn, V., Fedorchenko, V. (2009), "Continuous industrial transport machines" ["Mashyny promyslovoho transportu bezperervnoi dii"], Vydavnytstvo SNU im. V. Dalia, Luhansk, 134 p. available at: <https://www.twirpx.com>
9. Nevliudov, I., Andrusievych, A., Demska, N., Novoselov, S. (2019), "Technical means of automation" ["Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii"], Kryvorizkyi koledzh NAU, Kryvyi Rih, 450 p. available at: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/d9c8323a-0bca-44ed-83cb-f785872b19cb>
10. Diachenko, O., Delembovskyi, M., Levchuk, K., Protyven O. (2024), "An overview of the constructions of conveyors for moving bulk materials, comparison and study of their parameters", *Constructional, Road and Melioration Machines*, No. 103, P. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0301>
11. Bondariev, V., Dubynets, O., Kolisnyk, M. (2009), "Lifting and transport machines. Calculations of lifting and transport machines" ["Pidimno-transportni mashyny. Rozrakhunky pidiimalnykh i transportuvalnykh mashyn"], Vyscha shkola, Kyiv, 734 p. available at: <https://eruditor.link/file/371876/>
12. Yevsieiev, V., Nevliudov, I., Maksymova, S., Omarov, M., Klymenko, O. (2023), "Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software", *Applied Mathematics & Information Sciences an International Journal*, Vol. 17, No. 6, P. 1073–1088. DOI: <https://doi.org/10.18576/amis/170615>
13. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. (2024), "The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(27), P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>
14. Bortnowski, P., Kawalec, W., Król, R., Ozdoba, M. (2022), "Types and causes of damage to the conveyor belt-review, classification and mutual relations", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 140, 106520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>
15. Lavrinenko, Yu., Savchenko, P., Syniavskyi, O., Voitiuk, D., Savchenko, V., Holodnyi, I. (2017), "Basics of an electric drive" ["Osnovy elektroprivoda"], Lira-K, Kyiv, 524 p. available at: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Lavrin_2009_504.pdf
16. Vovk, O., Kvitka, S., Halko, S., Strebkov, O. (2019), "Energy-Saving Control of Asynchronous Electric Motors for Driving Working Machines", *Modern Development Paths of Agricultural Production*, Springer, Cham, P. 415–423. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
17. Esam, H., Ali, Ahmed J., Shanshal, Abdullah K. (2024), "Performance improvement of squirrel cage induction motor: A review paper", *Proceedings of the 4th International conference on sustainable engineering techniques (ICSET)*, Volume 3105, Issue 1, 15 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0212317>
18. Chermalykh, O., Danilin, O., Bosak, A., Toropova, L. (2021), "Automated electric drive of machines and installations" ["Avtomatyzovani elektroprivod mashyn ta ustanovok"], KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 60 p. available at: <https://ela.kpi.ua/Avtomatyzovanyi2021>
19. Voskoboinyk, V., Borodai, V., Borovyk, R., Nesterova, O. (2021), "Basics of the electric drive of production machines and complexes" ["Osnovy elektroprivoda vyrobnychkh mashyn ta kompleksiv"], Natsionalnyi TU "Dniprovska politehnika", Dnipro, 254 p. available at: https://elprivod.nmu.org.ua/files/automaticED/Посібник_основи_електропривода_2029.01.2021.pdf

20. Holodnyi, I., Sanchenko, O. (2020), "Adjustable asynchronous electric drive of the ventilation system with pulse-width control" ["Rehulovanyi asynkhronnyi elektropyvod ventyliatsiinoi systemy z shyrotno-impulsnym keruvanniam"], TOV "TsP "Kompyrnt", Kyiv, 117 p. available at: <http://rep.btsau.edu.ua/bitstream/BNAU/5617/1/Monographia%20Golodniy%D0%B9%202020.pdf>
21. Senko, V., Trubitsyn, K., Chybelis, V. (2020), "Inverters and frequency converters: monograph" ["Inventory i peretvoriuvachi chastoty: monohrafiia"], Lira-K, Kyiv, 300 p. available at: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi73/0054410.pdf>
22. Holodnyi, I., Lavrinenko, Yu., Kozyrskyi, V., Chervinskyi, L., Abduramanov, D., Toropov, A., Sanchenko, O. (2015), "Adjustable electric drive" ["Rehulovanyi elektropyvod"], TOV "TsP "Kompyrnt", Kyiv, 509 p. available at: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektropyvod.pdf>

Надійшла (Received) 20.11.24

Відомості про авторів / About the Authors

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, декан факультету комп'ютерної інженерії та управління, Харків, Україна; e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

Стародубцев Микола Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>

Макаренко Геннадій Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: hennadii.makarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9840-1219>

Пашенко Олександр Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-5244-5925>

Liashenko Oleksii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Dean of Faculty of Computer Engineering and Control, Kharkiv, Ukraine.

Starodubcev Nikolaj – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Makarenko Hennadii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Graduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Pashchenko Aleksandr – Graduate Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

CONTROL OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF CONVEYOR LINES

The **subject** of research is a method of controlling the speed of an asynchronous motor, connected according to the scheme of an asynchronous-valve stage, which increases the power factor of the drive and positively affects the power system as a whole. The **purpose** of the work is to develop and study methods of controlling electromechanical systems based on an asynchronous electric drive, which provide highly efficient operation of conveyor lines implemented on their basis as elements of complex technological equipment of an automated process control system. The article solves the following **problems**: analysis of conveyor line control tasks within the integrated automated process control system of production systems; analysis of actuating elements of conveyor lines electric drive; development of a method for regulating the speed of an asynchronous motor connected according to the circuit of an asynchronous-valve stage. The **methodology** of the work is based on the methods of the theory of electrical machines, the theory of the electric drive, numerous and analytical methods for solving differential equations, the theory of modeling. The **results** of the work include a method of controlling the speed of an asynchronous motor, based on the implementation of pulse control, characterized by the ability to maintain control angles of fully controlled power semiconductor elements to achieve a high power factor and change the frequency of turning on the power element of the electronic key that short-circuits the inverter. Influence of duration of relative duration of key commutation on performance element characteristics is investigated. **Conclusions.** Thus, the use of the proposed method of pulse control of the electric drive allows to expand the upper limit of speed control, increase the efficiency and power factor of the electric drive, reduce the inductance of the smoothing choke

Keywords: robotic systems; transport shuttle; conveyor line; automated control; induction motor.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ляшенко О. С., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С., Пашенко О. С. Керування електромеханічними системами конвеєрних ліній. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.085>

Liashenko, O., Starodubcev, N., Makarenko, H., Pashchenko, A. (2024), "Control of electromechanical systems of conveyor lines", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.085>

УДК 005.8:614.2

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.097>

А. ТРИГУБА, О. МАЛАНЧУК, Р. ШОЛУДЬКО

МОДЕЛІ АДАПТИВНО-ЦІННІСНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ГОСПІТАЛЬНИХ ОКРУГІВ

Предметом дослідження в статті є методологія та принципи адаптивно-ціннісного управління проєктами функціонування та розвитку госпітальних округів, що забезпечують досягнення цілей у межах визначеного бюджету, часу та з огляду на вимоги стейкхолдерів. **Мета роботи** – обґрунтувати принципи й на їх основі розробити логіко-принципову модель адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів, яка зважає на адаптивність до змін проєктного середовища, а також забезпечує ефективне планування, розподіл та використання ресурсів з огляду на ризики та цінності для стейкхолдерів. У статті розв'язуються такі **завдання**: 1) аналіз та опис структури госпітальних округів окремого регіону; 2) обґрунтування принципів, на яких оснований адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами функціонування та розвитку госпітальних округів; 3) аналіз схеми процесів і логіко-принципової моделі адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів, що описує взаємозв'язки між визначеними принципами. Застосовуються такі **методи**: аналіз і синтез; логіко-структурне моделювання; системний підхід; експертне оцінювання та методологія управління проєктами. **Досягнуті результати**: сформульовано принципи адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів; побудовано логіко-принципову модель, що інтегрує ключові чинники успіху проєктів, такі як адаптивність, цінність для стейкхолдерів, управління ризиками, стійкість та якість наданих медичних послуг; розроблено схему процесів адаптивно-ціннісного управління, що відтворює взаємодію між визначеними принципами. **Висновки**. Упровадження обґрунтованих принципів і на їх основі розробленої логіко-структурної моделі адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів дає змогу підвищити ефективність реалізації зазначених проєктів завдяки забезпеченню управлінських дій з огляду на зміни проєктного середовища, а також плануванню, розподілу та використанню ресурсів, зважаючи на ризики та цінності для стейкхолдерів. Це сприяє отриманню бажаного продукту проєктів функціонування та розвитку госпітальних округів, що позначиться на покращенні якості медичних послуг і стійкому розвитку госпітальних округів.

Ключові слова: госпітальні округи; адаптивно-ціннісне управління; проєкти; стійкість; ризики; цінність; логіко-структурне моделювання; розвиток медичних закладів.

Вступ

Система охорони здоров'я в Україні перебуває в стані активного реформування, спрямованого на підвищення ефективності та якості надання медичних послуг. В умовах обмеженості ресурсів, зростання попиту на медичну допомогу та різноманітності регіональних особливостей виникає потреба в запровадженні нових підходів до управління проєктами в цій галузі. Одним із перспективних напрямів є впровадження адаптивно-ціннісного підходу, що забезпечує гнучкість управлінських рішень і дає змогу зважати на особливі потреби госпітальних округів.

Госпітальні округи є ключовою ланкою в системі організації медичної допомоги на регіональному рівні [1]. Їх ефективне функціонування вимагає чіткої координації процесів управління, розподілу ресурсів і реалізації пріоритетних проєктів. У цьому контексті особливого значення набуває використання сучасних інструментаріїв до управління проєктами, що

сприяють інтегуванню інтересів усіх зацікавлених сторін, забезпечуючи сталий розвиток регіональних медичних систем [2].

Пропонований у статті адаптивно-ціннісний підхід передбачає застосування методів, що дають змогу не лише оптимізувати процес управління проєктами функціонування та розвитку госпітальних округів (ФРГО), а й оцінювати їх цінність для різних категорій користувачів. Зокрема, цей підхід спрямований на досягнення максимального соціально-економічного ефекту від впровадження проєктів, зважаючи на обмежені фінансові ресурси. Як зазначається в працях [3–5], успіх проєктів у сфері охорони здоров'я залежить від правильної ідентифікації потреб громад, адаптації стратегій до регіональних особливостей та залучення інноваційних технологій. Окрім того, впровадження інструментарію управління проєктами, орієнтованого на адаптацію до динамічних змін проєктного середовища, дає змогу мінімізувати ризики й підвищувати ефективність застосування ресурсів.

Використання логіко-структурних моделей, методів системної динаміки та інструментів оцінювання впливу проєктів є важливими складниками цього підходу. Наприклад, у роботах [1–8] розглядається доцільність застосування комплексного аналізу показників і моделей прогнозування для прийняття управлінських рішень.

Наукові дослідження підтверджують, що адаптивний підхід сприяє підвищенню якості управління проєктами в охороні здоров'я. Наприклад, відповідно до студій [9–11] інтеграція таких методів сприяла зменшенню витрат на медичні послуги в регіонах із різномірною демографією та водночас підвищила доступність медичної допомоги.

Ця стаття присвячена аналізу принципів і на їх основі створенню логіко-структурної моделі адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів, що бере до уваги пристосованість до змін проєктного середовища, а також ризики та цінності для стейкхолдерів.

Аналіз проблеми й наявних методів

Розвиток госпітальних округів є ключовим завданням у реформуванні системи охорони здоров'я, спрямованим на забезпечення доступності, якості та ефективності медичних послуг [12–14]. Проте існує

низка проблем, що ускладнюють досягнення цієї мети, а саме:

1) невизначеність та динамічність проєктного середовища – системи охорони здоров'я постійно зазнають впливу змін у законодавстві, фінансуванні, демографічних та епідеміологічних чинниках, що потребує високої адаптивності управління проєктами;

2) обмеженість ресурсів – нестача фінансових, кадрових та інфраструктурних ресурсів ускладнює ефективне планування й реалізацію проєктів розвитку госпітальних округів;

3) неузгодженість інтересів зацікавлених сторін – уважне ставлення до потреб і вимог різних стейкхолдерів, зокрема медичного персоналу, пацієнтів, місцевих органів влади та державних структур є викликом для ефективного управління;

4) управління ризиками – висока невизначеність і складність проєктів розвитку госпітальних округів потребують упровадження ефективних механізмів ідентифікації, оцінювання та мінімізації ризиків.

Наявні підходи до управління проєктами (табл. 1), зокрема каскадний (*Waterfall*), гнучкий (*Agile*), а також методології PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) та PRINCE2 (*Projects IN Controlled Environments*) пропонують загальні інструменти для організації проєктної діяльності [15–17].

Таблиця 1. Основні підходи до управління медичними проєктами

Методи	Особливості	Переваги застосування	Недоліки
Каскадний (<i>Waterfall</i>)	Лінійний підхід, чітке виконання етапів планування, реалізації та завершення.	Прозорість етапів, чіткість у визначенні завдань і результатів.	Низька гнучкість до змін, складність внесення коригувань після завершення етапів.
Гнучкий (<i>Agile</i>)	Ітеративний підхід, постійна адаптація до змін і активна взаємодія з учасниками проєкту.	Висока адаптивність, можливість швидко реагувати на зміни середовища.	Потребує значних людських ресурсів і високої залученості зацікавлених сторін.
PMBOK	Універсальна система знань про управління проєктами з чітким акцентом на процесах та інструментах.	Комплексний підхід, можливість адаптації до різних типів проєктів.	Значна кількість процесів ускладнює управління невеликими проєктами.
PRINCE2	Орієнтований на контроль середовища, структурний підхід до документування та управління ризиками.	Чітка структура управління, можливість легко відслідковувати прогрес і ризики.	Є надто складним для невеликих і динамічних проєктів через високу формалізацію процесів.

Проаналізовані основні підходи до управління медичними проєктами (табл. 1) не беруть до уваги особливості управління проєктами у сфері охорони здоров'я, яка визначається високою складністю, багатовекторністю завдань і важливістю досягнення цінності для зацікавлених сторін. Отже, адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку госпітальних округів є перспективним напрямом,

що дає змогу подолати наявні обмеження та забезпечити успішну реалізацію проєктів у межах доступних ресурсів.

Відомі методи оцінювання успішності проєктів зазвичай зосереджуються на досягненні часових, бюджетних та якісних параметрів [18, 19]. Однак вони не беруть до уваги стійкість проєктів до змін проєктного середовища та рівня отриманої цінності

для стейкхолдерів. Такий підхід унеможливило повну оцінку ефективності проєктів розвитку госпітальних округів. У цьому разі виникає потреба в розробленні нового підходу до управління проєктами, що поєднував би адаптивність, управління ризиками, забезпечення стійкості та максимізацію цінності для стейкхолдерів. Цей підхід має зважати на особливості медичних проєктів і відповідати умовам їх динамічного проєктного середовища.

Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку госпітальних округів бере до уваги особливості сучасного проєктного середовища медичних проєктів, що іноді ігноруються традиційними методами. Цей підхід допомагає забезпечити адаптивність до різних обставин завдяки швидкому реагуванню на зміни в законодавстві, фінансуванні, у демографічних і епідеміологічних факторах, а також ефективно управляти ризиками завдяки їх якісній ідентифікації та мінімізації, що пов'язано зі складністю й динамічністю проєктного середовища. Зазначений підхід зосереджує увагу на стійкості завдяки забезпеченню здатності госпітальних округів ефективно функціонувати за умов змін проєктного середовища та наявних викликів у медичній сфері. Він орієнтований на цінність, що забезпечує максимізацію вигід для стейкхолдерів завдяки уважному ставленню до їх потреб та вимог, а також передбачає гнучке управління ресурсами, сприяючи

оптимальному використанню фінансових, кадрових та інфраструктурних ресурсів.

Отже, адаптивно-ціннісний підхід є достатньо ефективним для управління проєктами розвитку госпітальних округів у сучасних умовах, оскільки він забезпечує досягнення цілей проєктів функціонування та розвитку госпітальних округів, зберігаючи їх стійкість і цінність для стейкхолдерів.

Метою статті є обґрунтування принципів і на їх основі розроблення логіко-структурної моделі адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку госпітальних округів, яка бере до уваги адаптивність до змін проєктного середовища, а також забезпечує ефективне планування, розподіл і використання ресурсів, зважаючи на ризики та цінності для стейкхолдерів.

Розв'язання завдання

У сучасних умовах реформування системи охорони здоров'я України на особливу увагу заслуговує проблема розвитку новостворених госпітальних округів. Під госпітальним округом розуміється функціональна мережа медичних закладів, розташованих на певній території, що забезпечує надання спеціалізованої (вторинної) лікарської допомоги жителям цієї території [20]. Медичні заклади, що належать до госпітальних округів, подані на рис. 1.

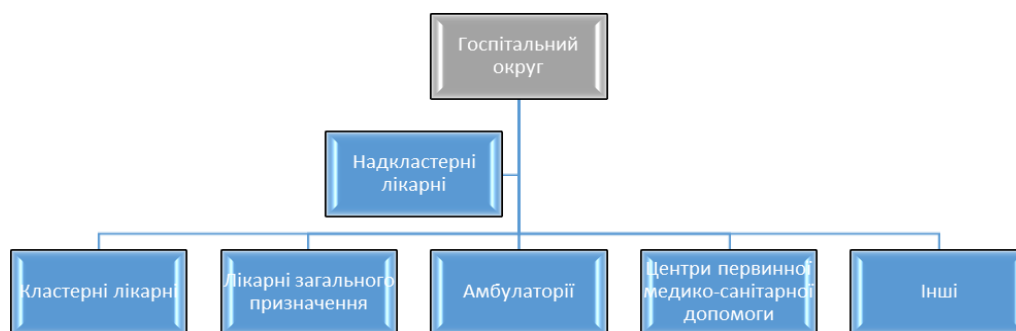


Рис. 1. Структура госпітальних округів окремого регіону

Склад госпітального округу містить не менше ніж один багатопрофільний заклад інтенсивного лікування першого та/або другого рівня та інші установи охорони здоров'я [20]. Для розвитку госпітальних округів необхідно реалізовувати відповідні проєкти. У цьому разі важливо обґрунтовувати доцільність реалізації низки проєктів функціонування та розвитку медичних закладів.

Відповідно, постає багато науково-прикладних завдань щодо ефективного керування цими проєктами. Одним з основних викликів є потреба балансування обмежених ресурсів і високих вимог до якості медичних послуг, що зумовлює потребу в нових підходах до управління проєктами. Крім того, спостерігається особливий вплив динамічного проєктного середовища на реалізацію

медичних проєктів. Адаптивно-ціннісне управління є інноваційним підходом, що поєднує гнучкість у прийнятті управлінських рішень під час реалізації проєктів ФРГО з огляду на потреби та цінності різних зацікавлених сторін, що особливо важливо в умовах постійних змін у соціально-економічному середовищі.

Госпітальні округи, які є основою для організації лікарської допомоги на регіональному рівні, повинні мати ефективну систему медичних закладів, що дасть змогу швидко адаптуватися до нових викликів, зокрема зміни демографічних показників, обмеженого фінансування та нових епідеміологічних загроз. Упровадження адаптивно-ціннісного управління під час реалізації проєктів ФРГО сприяє отриманню якісних продуктів проєктів, що підвищують ефективність і доступність медичних послуг, забезпечать оптимальний розподіл ресурсів, зважаючи на динамічне проєктне середовище та потреби населення в лікарських послугах.

Адаптивно-ціннісне управління проєктами ФРГО належить до підходу, спрямованого на забезпечення гнучкості й адаптивності в прийнятті управлінських рішень з огляду на ціннісні пріоритети зацікавлених сторін. Щодо розвитку госпітальних округів, то цей підхід є основним для ефективного формування системи охорони здоров'я регіонів. Саме він дає змогу узгоджувати потреби населення в медичних послугах, обмежені ресурси та мінливі умови зовнішнього проєктного середовища.

Запропонований адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами ФРГО ґрунтується на семи принципах, які зображені на рис. 2.



Рис. 2. Принципи, на яких базується адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами ФРГО

Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами ФРГО оснований на семи важливих принципах, що забезпечують гнучкість, ефективність та стійкість прийняття управлінських рішень. Цей підхід допомагає оптимізувати використання ресурсів та зважати на цінності зацікавлених сторін у динамічному проєктному середовищі.

Принцип адаптивності полягає в тому, що управління проєктами ФРГО має бути динамічним і гнучким, здатним швидко реагувати на зміни у внутрішньому та зовнішньому проєктному середовищі. Це стосується як змін у законодавстві, фінансуванні, так і виникнення нових соціальних чи епідеміологічних викликів. Адаптивність передбачає постійний моніторинг стану проєктного середовища, коригування планів і перерозподіл ресурсів відповідно до змін у проєктному середовищі.

Відповідно до принципу створення максимальної цінності всі проєкти ФРГО мають значущі пріоритети для різних груп зацікавлених сторін (пацієнтів, медичного персоналу, місцевих громад, державних органів, інвесторів тощо). Зазначений принцип забезпечує отримання узгоджених управлінських рішень, орієнтованих на задоволення потреб населення громади та поліпшення якості медичних послуг.

Принцип ефективного використання ресурсів госпітального округу зважає на їх обмеженість та оптимальне розподілення для досягнення максимального результату. У цьому разі здійснюється раціональне застосування фінансових, людських і матеріальних ресурсів з огляду на мінімізацію витрат та підвищення якості надання медичних послуг.

Принцип безперервного вдосконалення оснований на тому, що розвиток госпітальних округів є неперервним процесом. АЦУ ґрунтується на принципі постійного вдосконалення, що передбачає впровадження інновацій, передових технологій, підвищення кваліфікації медичного персоналу та модернізацію інфраструктури. Цей принцип забезпечує сталість надання лікарських послуг та готовність системи охорони здоров'я до нових викликів.

Принцип ризик-менеджменту передбачає підвищену увагу до можливих ризиків і невизначеностей, що є важливим складником адаптивно-ціннісного підходу до управління проєктами ФРГО. Керування ризиками передбачає ідентифікацію потенційних загроз, їх аналіз та розроблення стратегії для мінімізації їх впливу на реалізацію медичних проєктів. Зазначений принцип сприяє забезпеченню стабільності та стійкості госпітальних округів у кризових ситуаціях.

Принцип орієнтації на якісний продукт проєктів ФРГО орієнтований на досягнення конкретних, вимірюваних результатів проєктної діяльності. Для проєктів ФРГО це означає не лише досягнення планових показників, але й підвищення якості медичної допомоги, покращення здоров'я населення та задоволення потреб громад.

Принцип прозорості та підзвітності в прийнятті управлінських рішень перед зацікавленими сторонами є базовим принципом управління проєктами ФРГО. Він забезпечує довіру до проєктних офісів, системи охорони здоров'я та зменшує ризики непрозорих рішень, що призводить до неефективного застосування ресурсів у проєктах.

Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами ФРГО оснований на принципах гнучкості, орієнтації на цінності, ефективного використання ресурсів, безперервного вдосконалення, управління ризиками, орієнтації на результати та прозорості. Зазначені принципи забезпечують якісне управління в умовах обмежених ресурсів і динамічних змін у проєктному середовищі, сприяючи сталому розвитку госпітальних округів і підвищенню якості медичних послуг для населення.

Опишемо взаємозв'язки між принципами адаптивно-ціннісного управління проєктами ФРГО. Загальна ефективність управління проєктами ФРГО E подається як функція

$$E = f_1(A, C, R, I, M, O, T), \quad (1)$$

де A – адаптивність управління; C – ціннісно орієнтоване управління; R – ефективність використання ресурсів; I – безперервне вдосконалення (інновації); M – ризик-менеджмент; O – орієнтація на результати (якість продукту проєкту); T – прозорість і підзвітність.

Адаптивність A є основою, що дає змогу госпітальному округу гнучко реагувати на зміни в зовнішньому проєктному середовищі. Без високого рівня адаптивності інші принципи реалізовуватимуться неефективно, оскільки госпітальний округ не встигатиме реагувати на нові виклики. Ціннісно орієнтоване управління C забезпечує баланс між різними групами зацікавлених сторін проєктів ФРГО. Його вплив зростає за умови високої прозорості T , що сприяє підвищенню довіри між учасниками проєктів.

Ефективність застосування ресурсів R взаємопов'язана з використанням процесів ризик-менеджменту M , оскільки ефективність управління

ресурсами передбачає вміння уникати або мінімізувати ризики. Безперервне вдосконалення I завдяки впровадженню інновацій залежить від адаптивності A та ефективності використання ресурсів R , оскільки інновації застосовуються лише в середовищі, що здатне пристосовуватися до змін і раціонально використовувати ресурси. Ризик-менеджмент M впливає на всі інші елементи, оскільки ігнорування ризиків ставить під загрозу як адаптивність, так і ціннісно орієнтований складник управління проєктами ФРГО. Орієнтація на результати O визначає якість кінцевих продуктів проєктів ФРГО й тісно пов'язана з іншими принципами. Зокрема, досягнення якісних кінцевих продуктів проєктів неможливе без ефективного управління ресурсами, мінімізації ризиків і створення цінностей для зацікавлених сторін. Прозорість та підзвітність T посилює довіру між зацікавленими сторонами, що позитивно впливає на ціннісно орієнтоване управління C , орієнтацію на якість кінцевих продуктів проєктів O та ефективність управління ресурсами R .

Якщо брати до уваги описані вище взаємозв'язки між окремими принципами адаптивно-ціннісного підходу до управління проєктами ФРГО, формула (1) матиме вигляд

$$E = A \wedge (C \leftrightarrow T) \wedge R \wedge I \wedge M \wedge O, \quad (2)$$

де $(C \leftrightarrow T)$ – взаємозв'язок між цінністю та прозорістю, оскільки прозорість безпосередньо впливає на управління проєктами ФРГО, орієнтоване на цінності.

Принципи A , R , I , M і O впливають на загальну ефективність управління проєктами ФРГО як мультиплікативні складники.

Розглядаючи взаємозв'язки між принципами адаптивно-ціннісного управління проєктами ФРГО, необхідно зауважити, що кожен принцип взаємодіє з іншими, посилюючи або компенсуючи їх вплив. Наприклад, прозорість і підзвітність T забезпечує пом'якшувальний вплив на ризики M , а інновації I сприяють адаптивності A та покращенню якості продукту проєктів O .

Принцип адаптивності A безпосередньо пов'язаний із безперервним вдосконаленням I , оскільки адаптивність управління проєктами ФРГО дає змогу швидко впроваджувати інновації проєктами ФРГО та коригувати управлінські рішення у відповідь на зміни зовнішніх складників проєктного

середовища. Цей зв'язок можна подати у вигляді додаткового множника у формулі (2):

$$E = (A \wedge I) \wedge (C \vee T) \wedge R \wedge M \wedge O. \quad (3)$$

У формулі (3) $A \cdot I$ означає, що без належної адаптивності A навіть найкращі інновації I не можуть бути ефективно реалізовані. І навпаки, госпітальні округи, які не впроваджують нові методи та підходи до управління проектами, не здатні повністю реалізувати свій адаптивний потенціал.

Прозорість T також має сильний вплив на керування ризиками M проектів ФРГО, оскільки прозорі процеси дають змогу виявляти ризики на ранніх етапах, а також сприяють їх ефективному усуненню завдяки залученню всіх зацікавлених сторін. Це можна подати такою взаємозалежністю:

$$M = f_2(T). \quad (4)$$

У формулі (4) функція $f(T)$ означає, що ефективність управління ризиками проектів ФРГО прямо пропорційна рівню прозорості T . У загальній формулі (2) це позначається як посилений вплив прозорості T на зниження ризиків M :

$$E = (A \wedge I) \wedge (C \vee T) \wedge R \wedge (T \rightarrow M) \wedge O. \quad (5)$$

Ефективність використання ресурсів R тісно пов'язана з орієнтацією на результати O , оскільки раціональне управління ресурсами є ключовим для досягнення поставлених цілей – якісні продукти проектів ФРГО. Взаємозв'язок між цими принципами описується залежністю результатів O від ефективності застосування ресурсів R :

$$O = f_3(R). \quad (6)$$

У формулі (6) функція $f_3(R)$ визначає, що якість продуктів проектів ФРГО зростає пропорційно до раціонального використання ресурсів R . Це можна відтворити в формулі таким чином:

$$E = (A \wedge I) \wedge (C \vee T) \wedge (R \wedge (T \rightarrow M)) \wedge Q(R). \quad (7)$$

Отже, зважаючи на всі взаємозалежності між принципами адаптивно-ціннісного управління, маємо формулу (7) для оцінювання загальної ефективності управління проектами ФРГО. Ця формула дає змогу побудувати комплексне розуміння взаємозв'язків між ключовими принципами адаптивно-ціннісного управління проектами ФРГО, демонструючи, що кожен елемент управлінської системи впливає на її загальну ефективність.

Наукові основи адаптивно-ціннісного управління розвитком госпітальних округів ґрунтуються на інтеграції теоретичних знань і практичних підходів,

що забезпечують ефективну реалізацію проектів у сфері охорони здоров'я. Адаптивно-ціннісне управління розвитком госпітальних округів ґрунтується на описаних вище принципах адаптивного управління і запропонованого відповідного підходу, що орієнтовані на створення цінності для всіх зацікавлених сторін. Цей підхід передбачає гнучке управління, що допомагає реагувати на зміни в мінливому проектному середовищі та зважати на ресурсні можливості госпітальних округів, забезпечуючи водночас максимальну цінність для населення й медичних закладів та якість наданих лікарських послуг. Основними елементами адаптивно-ціннісного управління розвитком госпітальних округів є керування змінами, забезпечення створення максимальної цінності для зацікавлених сторін завдяки оптимізації використання доступних ресурсів.

Модель адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів передбачає оцінювання їх успіху U , що стосується досягнення поставлених цілей та очікуваних результатів у визначені терміни, у межах заданого бюджету, з дотриманням якості продукту, а також із забезпеченням отримання цінності для зацікавлених сторін:

$$U = f(A, C, P, C, Q), \quad (8)$$

де U – успіх проекту; A – адаптивність до змін у проектному середовищі; C – цінність для зацікавлених сторін; P – управління ризиками; C – стійкість як здатність госпітального округу протистояти впливам мінливого проектного середовища, змінам і викликам, зберігати свої основні функції, ефективність та структуру; Q – якість кінцевого продукту проектів (якість наданих медичних послуг тощо).

Запропонована формула (8) демонструє, що успіх проектів розвитку госпітальних округів залежить від оптимального поєднання адаптивності до змін у проектному середовищі, орієнтації на створення цінності для зацікавлених сторін, ефективного управління ризиками, а також забезпечення стійкості та якості кінцевого продукту проектів.

Для оцінювання ефективності адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів використовують інтегровану функцію ефективності:

$$E_U = \sum_{i=1}^n w_i V_i / C_{\text{tot}}, \quad (9)$$

де E_U – ефективність адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів;

w_i – ваговий коефіцієнт значущості i -го проекту;
 V_i – значення цінності, створене завдяки реалізації i -го проекту; C_{tot} – загальні витрати на реалізацію i -го проекту.

З формули (10) видно, що ефективність адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів залежить від загальної створеної цінності всіх проектів та їх повної значущості з огляду на витрати. Адаптивність управління проектами розвитку госпітальних округів забезпечується за допомогою керування змінами, що можна описати таким рівнянням:

$$\Delta P = dP/dt = f(E_x, I_x, R_x), \quad (10)$$

де ΔP – зміна конфігурації проектів; E_x – зовнішні чинники впливу на реалізацію проектів розвитку госпітальних округів; I_x – інновації, що впливають на реалізацію проектів розвитку госпітальних округів; R_x – ризики, які виникають під час реалізації проектів розвитку госпітальних округів.

Критерієм оптимізації застосування доступних ресурсів за умови впровадження адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку госпітальних округів є

$$R^{\text{opt}} = \min \left(\sum_{i=1}^n B_i / V_i \right), \quad (11)$$

де R^{opt} – оптимальне використання доступних у госпітальному окрузі ресурсів; B_i – витрати ресурсів на реалізацію i -го проекту; V_i – значення цінності, створене завдяки реалізації i -го проекту.

Формула (11) відтворює доцільність мінімізувати застосування ресурсів за максимальної створеної цінності завдяки реалізації проектів розвитку госпітальних округів.

Послідовність втілення процесів адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів зображена на рис. 3.

Для керування ризиками за умови впровадження адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів використовується така модель:

$$R_{\text{ef}} = R_m - \Delta R, \quad (12)$$

де R_{ef} – ефективність управління ризиками; R_m – початковий ризик; ΔR – зміна ризику внаслідок виконання управлінських дій.



Рис. 3. Послідовність реалізації процесів адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів

У процесі контролю стану реалізації проектів розвитку госпітальних округів соціальні та економічні дослідження лежать в основі коригування дій:

$$SE = f(Q, S, E_U), \quad (13)$$

де SE – соціально-економічний ефект від реалізації проектів розвитку госпітальних округів; Q – якість кінцевого продукту проекту (наданих лікарських послуг або створення медичного закладу); S – стійкість госпітальних округів; E_U – ефективність адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку госпітальних округів.

Отже, описані вище принципи та логіко-структурна модель адаптивно-ціннісного управління розвитком госпітальних округів ґрунтуються на комбінуванні гнучкості проектного управління з огляду на мінливе проектне середовище, орієнтацію на створення цінностей для зацікавлених сторін та ефективний розподіл ресурсів з пильною увагою до наявних ризиків. Це забезпечує успішну реалізацію проектів, стійкий розвиток госпітальних округів та підвищення якості лікарських послуг для населення регіону.

Для успішної реалізації проектів розвитку медичних закладів у Львівському госпітальному окрузі впроваджено адаптивно-ціннісний підхід. Його основними принципами є гнучкість, стійкість, управління ризиками, орієнтація на цінність для стейкхолдерів та якість досягнутих результатів. Автори статті проаналізували показники успішності проектів, зокрема виконання бюджету, дотримання

термінів та якість медичних послуг, за вищезазначеними принципами. Використано сукупність показників із п'яти медичних закладів Львівської області за 2020–2023 роки. Нижче подаємо базові показниками, що впливають на ефективність медичних проєктів.

1. Виконання бюджету – рівень фактичного використання коштів щодо затвердженого бюджету, який обчислюється за формулою

$$B = \frac{F}{A} \times 100\%, \quad (14)$$

де B – виконання бюджету, %; F – фактичні витрати на реалізацію медичного проєкту; A – затверджений бюджет медичного проєкту.

2. Дотримання термінів – відсоток медичних проєктів, виконаних у встановлені терміни, що визначається за формулою

$$T = \frac{C}{N} \times 100\%, \quad (15)$$

де T – дотримання термінів, %; C – кількість медичних проєктів, завершених у встановлені терміни; N – загальна кількість реалізованих медичних проєктів.

3. Якість медичних послуг – оцінювалася з огляду на рівень задоволеності пацієнтів (за допомогою анкетування) та відповідність стандартам охорони здоров'я на підставі використання формули

$$Q = \frac{S}{M} \times 100\%, \quad (16)$$

де Q – якість лікарських послуг, %; S – кількість позитивних оцінок у анкеті; M – загальна кількість отриманих оцінок.

4. Комплексний показник успішності – застосовується середньозважений показник, що визначається за формулою

$$P = w_1 \cdot B + w_2 \cdot T + w_3 \cdot Q, \quad (17)$$

де P – загальна успішність проєкту, %; w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, відповідно, для виконання бюджету, дотримання термінів та якості (визначаються залежно від пріоритетності); B, T, Q – значення показників виконання бюджету, дотримання термінів та якості.

Виконання бюджету B позначається на ефективності проєкту щодо підтримки фінансової стабільності та зниження фінансових ризиків. Це безпосередньо впливає на стійкість (здатність реалізовувати проєкт за зовнішніх і внутрішніх змін проєктного середовища без втрати фінансової стабільності) та управління ризиками (зменшення

ризиків щодо перевищення обмеженого бюджету). Дотримання термінів T реалізації проєкту відтворює здатність оперативно адаптуватися до змін (гнучкість) і підтримувати стабільність виконання (стійкість) затвердженого плану. Також завершення проєктів у задані терміни позитивно впливає на якість наданих послуг, а також відповідає очікуванням стейкхолдерів. Якість медичних послуг Q впливає на задоволеність вимог стейкхолдерів і відповідність медичним стандартам. Цей показник визначає, наскільки ефективно реалізовані проєкти і як їх продукти відповідають потребам і очікуванням стейкхолдерів, підвищуючи їх цінність. Комплексний показник успішності P демонструє внесок кожного з цих критеріїв у загальну ефективність, забезпечуючи зв'язок між усіма показниками.

На підставі описаного вище оцінено ефективність реалізації медичних проєктів і виявлено напрями для вдосконалення (табл. 2).

Таблиця 2. Результати оцінювання ефективності впровадження адаптивно-ціннісного підходу в управління медичними проєктами розвитку Львівського госпітального округу

Показники	Ефективність, %	Вагові коефіцієнти	Зважений внесок
Гнучкість	85	0,2	17,0
Стійкість	78	0,2	15,6
Управління ризиками	92	0,3	27,6
Цінність для стейкхолдерів	88	0,2	17,6
Якість	81	0,1	8,1
Загальна ефективність	–	–	85,9

Установлено, що кожний принцип значно впливає на досягнення ключових цілей медичних проєктів. Гнучкість становить 85%, що забезпечує адаптацію до змін у законодавстві та фінансуванні й дає змогу уникнути затримок і перевитрат бюджету. Стійкість становить 85%, що сприяє збереженню ефективності медичних проєктів навіть в умовах кризи (наприклад, пандемії). Управління ризиками на 92% мінімізує ймовірність перевищення бюджету та недотримання стандартів якості. Орієнтація на цінність для стейкхолдерів, яка становить 88%, дає змогу покращити задоволеність пацієнтів з огляду на їхні потреби. Якість наданих медичних послуг становить 81% і забезпечує їх відповідність сучасним стандартам.

На основі досягнутих показників можна зробити висновок, що найвищий рівень впливу на ефективність медичних проєктів продемонстрували принципи управління ризиками (92%) та орієнтації на цінність для стейкхолдерів (88%). Це свідчить про те, що стратегічне планування, оцінювання ризиків і адаптація під потреби населення є

визначальними чинниками успіху проєктів розвитку госпітальних округів.

На рис. 4 зображено діаграму впливу окремих принципів на рівень досягнення цілей проєктів розвитку госпітальних округів. Найбільший вплив демонструють принципи управління ризиками та орієнтації на цінність.

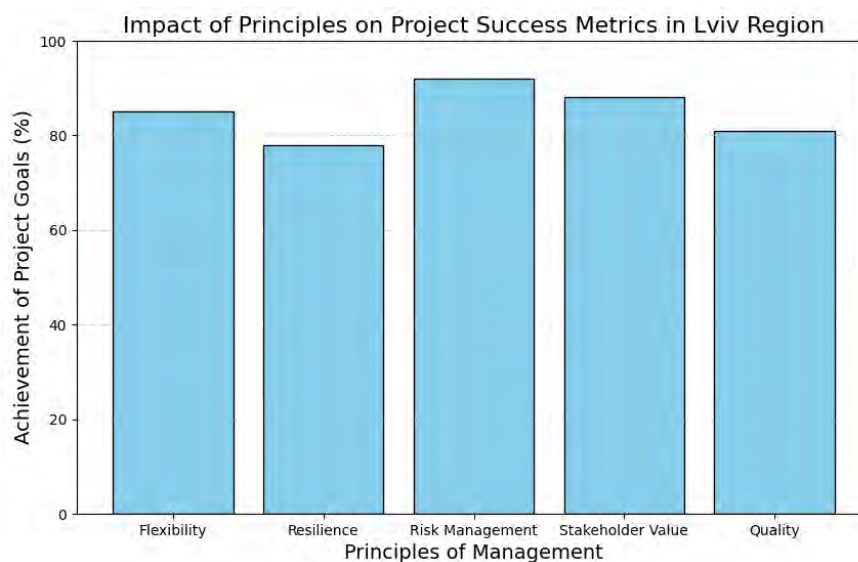


Рис. 4. Діаграма впливу окремих принципів на рівень досягнення цілей проєктів розвитку Львівського госпітального округу

Результати розрахунків підтверджують ефективність упровадження адаптивно-ціннісного підходу в управління проєктами розвитку госпітальних округів. Подальше дослідження буде спрямовано на вивчення впливу принципів управління ризиками та орієнтації на потреби стейкхолдерів, що дасть змогу підвищити ефективність реалізації медичних проєктів, зокрема забезпечити оптимальне використання ресурсів і задоволення потреб стейкхолдерів.

Висновки

Описана структура госпітальних округів зважає на чинні вимоги до формування госпітальних округів, що лежить в основі забезпечення ефективного функціонування та розвитку системи охорони здоров'я в окремому регіоні. Ця структура інтегрує сучасні вимоги до територіального планування систем надання медичних послуг, забезпечує оптимальний доступ до лікарської допомоги, зважаючи на демографічні, географічні та соціально-економічні особливості регіону. Описана структура є основою для подальшої реалізації проєктів розвитку госпітальних округів, спрямованих на забезпечення

стійкості системи охорони здоров'я, гнучкості до змін у проєктному середовищі та орієнтації на потреби населення.

Сформульовано сім принципів адаптивно-ціннісного управління проєктами госпітальних округів, що забезпечують системну основу для реалізації проєктів у складному та мінливому проєктному середовищі. Вони охоплюють такі складники: гнучкість, стійкість, ризики, ефективний розподіл ресурсів, досягнення якості продукту та створення цінності для зацікавлених сторін. Перелічені принципи сприяють формуванню стратегічного підходу до управління проєктами, що бере до уваги всі ключові аспекти сучасної системи охорони здоров'я.

Розроблена логіко-структурна модель допомагає описати взаємозв'язки між принципами адаптивно-ціннісного управління, що забезпечує їх інтеграцію в процеси управління проєктами. Ця модель є ефективним інструментом для оцінювання впливу кожного з принципів на успіх проєкту, що дає змогу оптимізувати рішення та забезпечити досягнення цілей проєктів розвитку госпітальних округів. Зазначена модель сприяє побудові прозорої системи

управління, яка відповідає сучасним вимогам і викликам проєктного середовища.

Адаптивно-ціннісне управління передбачає виконання п'яти груп управлінських процесів, що забезпечують інтеграцію гнучкості, орієнтації на цінність та управління ризиками на кожному етапі проєкту. Запропонована послідовність виконання процесів допомагає ефективно планувати, виконувати, контролювати та завершувати проєкти, забезпечуючи досягнення цілей у межах заданого бюджету, термінів і з дотриманням якості медичних послуг. Вона лежить в основі розроблення інструментарію для ефективної реалізації проєктів розвитку госпітальних округів, орієнтованих на створення цінності для стейкхолдерів.

Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами є основою ефективного функціонування та

розвитку госпітальних округів, оскільки сім обґрунтованих його принципів забезпечують гнучкість і адаптацію до мінливого проєктного середовища, орієнтацію на цінність стейкхолдерів та оптимізацію ресурсів, зважаючи на ризики. Окреслені наукові основи адаптивно-ціннісного підходу до управління проєктами функціонування та розвитку госпітальних округів передбачають виконання п'яти груп управлінських процесів, що ґрунтуються на комбінуванні гнучкості проєктного управління з огляду на мінливе проєктне середовище, орієнтації на створення цінностей для зацікавлених сторін та ефективному розподілі ресурсів з увагою на наявні ризики. Адаптивно-ціннісне управління не лише відповідає на виклики сучасності для госпітальних округів, але й формує стратегічну основу для досягнення соціально-економічних цілей у сфері охорони здоров'я.

Список літератури

1. Malanchuk O., Tryhuba A., Tryhuba I., Bandura I. A conceptual model of adaptive value management of project portfolios of creation of hospital districts in Ukraine. *Proceedings of the 4th International Workshop IT Project Management (ITPM 2023). CEUR Workshop Proceedings*, 3453, Warsaw, Poland, 2023, P. 82–95. DOI: <https://ceur-ws.org/Vol-3453/paper8.pdf>
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 27 листопада 2019 р. № 1074 "Деякі питання створення госпітальних округів". URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/482216_711518 (дата звернення: 15.10.2024).
3. Stovban M. P., Mykhalchuk V. M., Tolstanov A. K., Maglona V. V. Interaction links of healthcare institutions within one hospital district. *Wiadomości Lekarskie*. 2021. LXXIV, 3, 2. P. 756–760. DOI: <https://doi.org/10.36740/WLek202103236>
4. Деренська Ю. Аспекти впровадження проєктно-орієнтованого управління в діяльність закладів охорони здоров'я. *Економічний вісник НТУУ "КПІ"*, 2022. 21. 254–841. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254841>
5. Malanchuk O., Tryhuba A., Tryhuba I., Sholudko, R., Pankiv, O. A neural network model-based decision support system for time management in pediatric diabetes care projects. *IEEE 18th international conference on computer science and information technologies (CSIT 2023)*. Lviv. 2023. P. 191–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324014>
6. Bushuyev S., Ivko A., Ilin O. The syncretic project management model in BANI environment. *Proceedings of the 8th International Scientific Conference «Scientific Results»* (November 7–8, 2024). Rome, Italy. 2024. 8. URL: <https://ojs.publisher.agency/index.php/SR/article/view/4567>
7. Iastremska O., Malyarets L., Samoilenko V., Budarin O. Management of innovative projects to ensure innovative development of enterprises. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2024. No. 3 (29). P. 104–120. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.104>
8. Матківська Х., Зачко О. Моделі цифровізації систем HR-менеджменту безпеко-орієнтованих організацій. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. 1(27). С. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.204>
9. Dotsenko N., Chumachenko I., Kraivskyi B., Railian M., Litvinov A. Methodological support for managing of critical competences in agile transformation projects within a multi-project medical environment. *Advanced Information Systems*. 2024. 8 (4), P. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.04>
10. Тригуба А., Маланчук О., Ратушний А., Паньків О., Коваль Л., Шолудько Р., Андрушків О. Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку громад та регіонів. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія "Агроінженерні дослідження"*, 2023, 27, С. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.113>
11. Данченко О. Б., Лепський В. В. Моделі стратегічного менеджменту медичних проєктів проєктно-орієнтованого медичного закладу. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: "Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами"*. Харків: НТУ "ХПІ", 2017. 42 (948). С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2018.1278.7>

12. Li J., Guo B., Huang X., Wang H., Zuo G., Lu W. Study of the medical service efficiency of county-level public general hospitals based on medical quality constraints: a cross-sectional study. *BMJ Open*. 2023 Jan 23; 13(1): e059013. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-059013>
13. Kerzner H. Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling. 10th ed. Project management. 2009. 1121 p. URL: <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20PROYEK/project-management-harold-kerzner1.pdf>
14. Полупан Ю., Малеева О. Системна модель ризиків та дерева альтернативних рішень з удосконалення логістичного ланцюга виробничого підприємства. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. 2(28), С. 133–142. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.133>
15. Bezkorovainyi V., Kolesnyk L., Gopejenko V., Kosenko V. The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty. *Advanced Information Systems*. 2024. 8 (2). P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.04>
16. Fontalvo-Herrera T., Delahoz-Dominguez E., Fontalvo O. Methodology of classification, forecast and prediction of healthcare providers accredited in high quality in Colombia. *International Journal of Productivity and Quality Management*. 2021. 33(1), P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPM.2021.115290>
17. Chen S.; Wang C.; Yan K. Assessing Project Resilience Through Reference Class Forecasting and Radial Basis Function Neural Network. *Appl. Sci*. 2024, 14, 10433 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210433>
18. Hnatchuk Y., Pavlova O., Havrylyuk K. Method of forecasting the characteristics and evaluating the implementation success of IT projects based on requirements analysis. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. 2853, P. 248–258. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2853/paper23.pdf>
19. Schnegg M., Möller K. Strategies for data analytics projects in business performance forecasting: a field study. *J Manag Control*. 2022. 33. P. 241–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00187-022-00338-7>
20. Про затвердження Порядку створення госпітальних округів: Постанова Кабінету Міністрів України від 30.11.2016 р. № 932. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-%D0%BF> (дата звернення: 20.09.2024).

References

1. Malanchuk, O., Tryhuba, A., Tryhuba, I., Bandura, I. (2023), "A conceptual model of adaptive value management of project portfolios of creation of hospital districts in Ukraine", *Proceedings of the 4th International Workshop IT Project Management (ITPM 2023)*, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3453, Warsaw, Poland, P. 82–95. DOI: <https://ceur-ws.org/Vol-3453/paper8.pdf>
2. Cabinet of Ministers of Ukraine (2019), "On some issues of the creation of hospital districts", *Official document*, available at: https://zakononline.com.ua/documents/show/482216___711518 (last accessed 15.10.2024).
3. Stovban, M. P., Mykhalchuk, V. M., Tolstanov, A. K., Maglona, V. V. (2021), "Interaction links of healthcare institutions within one hospital district", *Wiadomości Lekarskie*, Vol. LXXIV, No. 3(2), P. 756–760. DOI: <https://doi.org/10.36740/WLek202103236>.
4. Derenska, Yu. (2022), "Aspects of project-oriented management in the activities of healthcare institutions", *Economic Bulletin of NTUU KPI*, Vol. 21, P. 254–841, DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254841>
5. Malanchuk, O., Tryhuba, A., Tryhuba, I., Sholudko, R., Pankiv, O. (2023), "A neural network model-based decision support system for time management in pediatric diabetes care projects", *IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT 2023)*, Lviv, Ukraine, P. 191–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324014>
6. Bushuyev, S., Ivko, A., Ilin, O. (2024), "The syncretic project management model in BANI environment", *Proceedings of the 8th International Scientific Conference "Scientific Results"*, Rome, Italy, Vol. 8, available at: <https://ojs.publisher.agency/index.php/SR/article/view/4567>
7. Iastremska, O., Malyarets, L., Samoilenko, V., Budarin, O. (2024), "Management of innovative projects to ensure innovative development of enterprises", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3(29), P. 104–120, DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.104>
8. Matkivska, K., Zachko, O. (2024), "Models of digitization of HR management systems of security-oriented organizations", *Current state of scientific research and technology in the industry*, Vol. 1(27), P. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.204>
9. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Kraivskyi, B., Railian, M., Litvinov, A. (2024), "Methodological support for managing of critical competences in agile transformation projects within a multi-project medical environment", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, No. 4, P. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.04>

10. Tryhuba, A., Malanchuk, O., Ratushnyi, A., Pankiv, O., Koval, L., Sholudko, R., Andrushkiv, O. (2023), "Adaptive value-based approach to managing projects of community and regional development", *Bulletin of Lviv National Ecological University. Series: Agroengineering Research*, Vol. 27, P. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.113>
11. Danchenko, O. B., Lepskyi, V. B. (2017), "Models of strategic management of medical projects in project-oriented medical institutions", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management*, Vol. 42(948), P. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2018.1278.7>
12. Li, J., Guo, B., Huang, X., Wang, H., Zuo, G., Lu, W. (2023), "Study of the medical service efficiency of county-level public general hospitals based on medical quality constraints: A cross-sectional study", *BMJ Open*, Vol. 13(1), P. e059013, DOI: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2021-059013>
13. Kerzner, H. (2009), *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*, 10th ed., Project Management Institute, available at: <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20MANAJEMEN%20PROYEK/project-management-harold-kerzner1.pdf>
14. Polupan, Yu., Maleieva, O. (2024), "System risk model and decision tree for improving the logistics chain of a manufacturing enterprise", *Current state of scientific research and technology in the industry*, Vol. 2(28), P. 133–142. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.2.133>
15. Bezkorovainyi, V., Kolesnyk, L., Gopejenko, V., Kosenko, V. (2024), "The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, No. 2, P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.04>
16. Fontalvo-Herrera, T., Delahoz-Dominguez, E., Fontalvo, O. (2021), "Methodology of classification, forecast, and prediction of healthcare providers accredited in high quality in Colombia", *International Journal of Productivity and Quality Management*, Vol. 33(1), P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPM.2021.115290>
17. Chen, S., Wang, C., Yan, K. (2024), "Assessing project resilience through reference class forecasting and radial basis function neural network", *Applied Sciences*, Vol. 14, 10433 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210433>
18. Hnatchuk, Y., Pavlova, O., Havrylyuk, K. (2021), "Method of forecasting the characteristics and evaluating the implementation success of IT projects based on requirements analysis", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2853, P. 248–258. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2853/paper23.pdf>
19. Schnegg, M., Möller, K. (2022), "Strategies for data analytics projects in business performance forecasting: A field study", *Journal of Management Control*, Vol. 33, P. 241–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00187-022-00338-7>
20. Cabinet of Ministers of Ukraine (2016), "On approval of the procedure for the creation of hospital districts", *Official document*, available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/932-2016-%D0%BF> (last accessed 20.09.2024).

Надійшла (Received) 16.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тригуба Анатолій Миколайович – доктор технічних наук, професор, Львівський національний університет природокористування, завідувач кафедри інформаційних технологій, Львів, Україна; e-mail: trianamik@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661>

Маланчук Оксана Михайлівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, доцент кафедри біофізики, Львів, Україна; e-mail: Oksana.malan@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7518-7824>

Шолудько Роксолана Ярославівна – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, здобувач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львів, Україна; e-mail: roksolanasoludko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-6149-7354>

Tryhuba Anatolii – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Lviv National University of Nature Management, Head at the Department of Information Technologies, Lviv, Ukraine.

Malanchuk Oksana – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, Lviv National Medical University named after Danylo Halytskyi, Associate Professor at the Department of Biophysics, Lviv, Ukraine.

Sholudko Roksolana – Lviv State University of Life Safety, PhD Student at the Department of Information Technologies and Electronic Communication Systems, Lviv, Ukraine.

MODELS OF ADAPTIVE AND VALUE-BASED MANAGEMENT OF PROJECTS FOR THE FUNCTIONING AND DEVELOPMENT OF HOSPITAL DISTRICTS

The **subject matter** of the article is the methodology and principles of adaptive-value-based project management of hospital districts' functioning and development, which ensure the achievement of goals within the specified budget, and time and with due regard to the expectations of the stakeholders. The **goal** of the work is to substantiation of the principles and, on their basis, development of a logical and principled model of adaptive and value-based management of hospital district development projects, which takes into account adaptability to changes in the project environment, as well as ensures effective planning, allocation and use of resources, taking into account risks and value for stakeholders. The following **tasks** were solved in the article: 1) analysis and description of the structure of hospital districts in a particular region; 2) substantiation of the principles on which the adaptive value-based approach to project management of hospital district functioning and development is based; 3) description of the process flowchart and logic-principle model of adaptive value-based management of hospital district development projects, which describes the relationships between the identified principles. The following **methods** used are – analysis and synthesis; logical and structural modeling; systematic approach; expert evaluation and project management methodology. The following **results** were obtained – the principles of adaptive value-based management of hospital district development projects are formulated; a logical-principled model is built that integrates key project success factors such as adaptability, value for stakeholders, risk management, sustainability and quality of health care services; a scheme of adaptive value-based management processes is developed that reflects the interaction between the defined principles. **Conclusions:** The use of sound principles and, on their basis, the developed logical and principled model of adaptive value-based management of hospital district development projects allows to increase the efficiency of implementation of these projects by ensuring management actions taking into account changes in the project environment, as well as planning, allocation and use of resources taking into account risks and value for stakeholders. This contributes to obtaining the desired product of hospital districts' functioning and development projects, which is reflected in the improvement of the quality of medical services and sustainable development of hospital districts.

Keywords: hospital districts; adaptive value-based management; projects; sustainability; risks; value logical-structural modeling; healthcare facilities development.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Тригуба А. М., Маланчук О. М., Шолудько Р. Я. Моделі адаптивно-ціннісного управління проектами функціонування та розвитку госпітальних округів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 97–109. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.097>

Tryhuba, A., Malanchuk, O., Sholudko, R. (2024), "Models of adaptive and value-based management of projects for the functioning and development of hospital districts", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 97–109. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.097>

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДИФІКАЦІЙ ІНТЕРПРЕТАЦІЙНОГО МЕТОДУ *DeepLIFT*

Предметом дослідження є покращення інтерпретаційного методу *DeepLIFT* (*Deep Learning Important Features*) у контексті забезпечення оцінки якості програмних систем (ПС). Вивчаються алгоритмічні та математичні аспекти базового методу *DeepLIFT*, а також його вдосконалення для аналізу та покращення показників якості ПС. **Мета роботи** – розроблення та обґрунтування п'яти способів оптимізаційних модифікацій методу *DeepLIFT* для покращення точності та ефективності прогнозування показників якості ПС. У статті необхідно виконати такі **завдання**: детально проаналізувати проблеми, пов'язані із застосуванням методу *DeepLIFT* у процесі оцінювання якості ПС; надати математичний опис п'яти способів модифікації методу *DeepLIFT*, спрямованих на покращення точності, адаптивності та швидкості оцінювання показників якості; експериментально протестувати запропоновані модифікації для оцінювання їх ефективності в процесі визначення якості ПС порівняно з оригінальним методом *DeepLIFT*. **Методи дослідження**: аналіз літератури; експериментальна верифікація; обчислення середніх значень та застосування тестів значущості; моделювання. **Досягнуті результати**: 1) детально проаналізовано обмеження базового методу *DeepLIFT* у контексті сучасних програмних систем, унаслідок чого виявлено низьку адаптивність до динамічних показників, обмежену інтерпретованість для складних архітектур та труднощі зі стабільністю результатів у разі мінливих умов експлуатації; 2) запропоновано п'ять удосконалень методу *DeepLIFT*; 3) експериментально протестовано модифікації, що довело їх ефективність порівняно з оригінальним методом *DeepLIFT*. Результати дослідження продемонстрували, що всі модифікації дають змогу досягти покращень за ключовими параметрами. **Висновки**: в умовах зростання складності архітектур, збільшення обсягу інформації та вимог до продуктивності інноваційні методи оцінювання та прогнозування якості ПС стають необхідністю. Кожен з удосконалених методів підвищує точність та інтерпретованість порівняно з базовим *DeepLIFT*. Найвищу точність демонструє темпоральний *DeepLIFT* (*T-DLIFT*) відповідно.

Ключові слова: моделювання; *DeepLIFT*; інновації; оцінка якості; нейронні мережі; оптимізація.

Вступ

В умовах постійного розвитку сучасних інформаційних технологій (ІТ) прогнозування показників якості ПС є досить важливим завданням. На думку авторів праці [1], зазначене питання має комплексний характер і зумовлений низкою причин, а саме: високою складністю програмних продуктів, постійним збільшенням вимог до їх надійності, продуктивності та масштабованості. Зі свого боку ці вимоги на практично-методичному рівні сприяють необхідності використовувати інноваційні методи оцінювання та прогнозування якості ПС.

Згідно з роботою [2] важливість застосування інноваційних методів оцінювання та прогнозування якості ПС насамперед зумовлена тим, що традиційні підходи не завжди можуть брати до уваги складність сучасних ПС. Аналогічна позиція спостерігається і в праці [3], де зазначено, що для сучасних ПС властиве суттєве зростання обсягу інформації, складності архітектур та вимог до продуктивності. Зрештою виникають нові технологічно дослідні виклики, які потребують більш гнучких і точних рішень.

Натомість ПС мають відповідати високим вимогам щодо надійності, масштабованості та продуктивності, що особливо важливо в умовах конкуренції на ринку ІТ. Тому інноваційні методи, зокрема модифіковані інтерпретаційні техніки для нейронних мереж, стають ключовими під час точного прогнозування якості ПС. У наведеному вище контексті особливе місце посідають інтерпретаційні методи для нейронних мереж, серед яких метод *DeepLIFT*. Як зазначено в праці [4], він є одним із провідних в оцінюванні якості сучасних ПС.

У роботі [5] зауважено, що метод *DeepLIFT* дає змогу визначати внесок окремих вхідних параметрів у результат роботи моделі, що робить його надзвичайно корисним для аналізу ПС. Однак практичні підходи, що застосовуються в *DeepLIFT*, потребують подальшого вдосконалення для підвищення точності прогнозування та адаптації до особливих завдань прогнозування якості ПС.

У другу чергу сучасні ПС часто реалізуються на основі мікросервісної архітектури, розподілених систем і хмарних платформ [6]. Це спричиняє значні виклики в їх інтеграції, моніторингу та оцінюванні

якості. Традиційні методи, основані на лінійних або статичних моделях, не можуть адекватно відтворити динаміку та взаємозв'язки між різними компонентами системи. Зазначене вище вимагає розроблення нових методів, здатних брати до уваги складні взаємодії між модулями та забезпечити точність у прогнозуванні показників якості.

У третю чергу варто наголосити, що в сучасному світі бізнесу та технологій суттєво зростає потреба у швидкій адаптації до мінливих умов ринку, що стає все більш важливим. Клієнти очікують миттєвого реагування від ПС, що зумовлює необхідність оперативного аналізу їх продуктивності та надійності. Традиційні підходи до оцінювання якості часто виявляються надто повільними та громіздкими для реалізації в умовах швидкої зміни вимог. На практиці окреслена проблема спонукає до розроблення більш гнучких і адаптивних рішень, здатних оперативно реагувати на зміни в умовах експлуатації та забезпечувати високу продуктивність у реальному часі.

Тому, зважаючи на зазначені факти, на комплексному рівні наголошується на актуальності пошуку більш сучасних модифікацій методу *DeepLIFT*, що будуть спрямовані на покращення інтерпретації та точності прогнозування показників якості ПС. Такі вдосконалення мають дати змогу глибше аналізувати взаємозв'язки між вхідними та якісними показниками ПС, що сприятиме більш ефективному оцінюванню та покращенню їх функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розглядаючи фахову літературу, присвячену аналізу доцільності застосування методу *DeepLIFT* у контексті оцінювання якості ПС, варто зазначити, що наукові погляди з окресленого питання досить різняться, оскільки впровадження методу в цій галузі є відносно новим і залежить від типу завдань, які розв'язуються. Зокрема в праці [7] зазначено, що *DeepLIFT* є потужним інструментом для інтерпретації та прогнозування якості ПС, оскільки він дає змогу точно оцінювати вплив вхідних параметрів на результати роботи моделей нейронних мереж, що робить цей метод корисним для прогнозування продуктивності та надійності складних ПС, зокрема в умовах динамічних навантажень.

У роботі [8] *DeepLIFT* був успішно застосований для оцінювання масштабованості великих ПС, що допомогло виявити основні фактори, які впливають на їх продуктивність.

Автори праці [9] зазначають, що метод дає змогу глибше аналізувати вплив різних вхідних параметрів, що є критично важливим для високоточних прогнозів, оскільки *DeepLIFT* допомагає виявляти приховані зв'язки між вхідними показниками та показниками якості програмного забезпечення, що сприяє вдосконаленню процесу прийняття рішень під час розроблення та тестування ПС. Проте, окрім переваг, для аналізованого методу властива низка практичних недоліків. Так, у дослідженні [10] наголошується, що цьому методу притаманна недостатня адаптивність для складних архітектур. Варто зазначити обмеженість *DeepLIFT* в оцінюванні якості складних програмних архітектур, зокрема мікросервісних систем або розподілених систем. У таких випадках зазначений метод може демонструвати недостатню точність або бути складним у реалізації, оскільки вимагає глибокої адаптації під специфічні архітектури. Аналогічно в праці [11] визначено, що метод *DeepLIFT* погано адаптується для оцінювання продуктивності та стійкості хмарних сервісів із високим рівнем динамічності навантажень. На думку авторів роботи [12], для *DeepLIFT* властива проблема надмірної залежності від вибору референтних значень. Її сутність полягає в тому, що цей метод сильно залежить від вибору референтних значень, що в процесі реалізації може бути проблематичним для систем із значною кількістю змінних факторів.

Некоректний вибір референтних значень може суттєво знизити точність оцінки якості програмних систем. Зокрема в праці [13] було виявлено, що застосування *DeepLIFT* для прогнозування надійності ПС із динамічними конфігураціями, вибір референтних значень спричинив значні похибки в інтерпретації результатів.

На практиці сказане вище означає, що в застосуванні методу *DeepLIFT* для прогнозування надійності ПС із динамічними конфігураціями існує ризик досягти неточних або хибних результатів через неправильний вибір референтних значень. Оскільки референтні значення є базовими для порівняння впливу вхідних параметрів на результати моделі, їх некоректне визначення може суттєво вплинути на інтерпретацію. Зокрема це може призвести до таких практичних наслідків:

- неправильні висновки щодо факторів, які впливають на надійність: метод може некоректно вказати на ключові параметри, що позначаються на надійності системи, унаслідок чого ускладнюється процес оптимізації ПС [14];

– проблеми з адаптацією ПС до динамічних змін: у разі, коли конфігурації системи постійно змінюються, некоректні референтні значення можуть спричинити помилкові прогнози щодо того, як ці зміни вплинуть на надійність програмного забезпечення [15];

– підвищення ризику помилок в експлуатації: хибна інтерпретація результатів може призвести до впровадження неправильних рішень у процесі підтримки чи оновлення системи, що підвищує ризик виникнення збоїв чи відмов у роботі програмного забезпечення [16].

Отже, правильний вибір референтних значень є критично важливим для отримання точних прогнозів і забезпечення високої надійності програмних систем, особливо в умовах динамічних конфігурацій.

**Визначення не розв'язаних раніше
частин загальної проблеми.
Мета роботи й завдання**

У праці [7] наголошується, що метод *DeepLIFT*, хоча й ефективний для нейронних мереж, проте має обмежене застосування для інших типів моделей, що використовуються для оцінювання якості ПС, таких як класичні алгоритми машинного навчання або статистичні методи. Через цю проблему *DeepLIFT* показує низьку ефективність порівняно з іншими інтерпретаційними методами.

На практиці це означає, що метод *DeepLIFT*, хоча й добре працює з нейронними мережами, проте не є універсальним для оцінювання якості ПС з використанням, наприклад, класичних алгоритмів машинного навчання або статистичних методів. Це може спричинити кілька важливих практичних наслідків. Розглянемо їх детальніше.

– *Недостатня точність у різних моделях*: *DeepLIFT* може давати менш точні результати в роботі з моделями, які не є нейронними мережами, оскільки він не адаптований для їх інтерпретації. На практиці зазначене вище може призвести до хибної оцінки важливих параметрів якості ПС за умови використання інших алгоритмів, таких як регресія або дерева рішень.

– *Втрата інформативності*: для класичних алгоритмів машинного навчання та статистичних моделей існують більш ефективні інтерпретаційні методи, зокрема *LIME* або *SHAP*, які здатні краще відтворити вплив окремих параметрів на результати. Використання *DeepLIFT* у цих випадках може призвести до зниження інформативності аналізу.

– *Обмеженість у виборі моделей для аналізу*: через низьку ефективність *DeepLIFT* для інших моделей організації змушені використовувати лише нейронні мережі для прогнозування якості ПС, що може не завжди бути оптимальним рішенням для конкретних завдань. Це обмежує можливості експериментів і тестування різних підходів для оцінювання якості програмного забезпечення.

Зокрема в праці [8] зазначено, що для задач, де використовуються інші типи моделей, окрім нейронних мереж, застосування *DeepLIFT* є менш ефективним. Тому виникає нагальна потреба пошуку альтернативних методів інтерпретації, щоб забезпечити точну й надійну оцінку якості ПС.

Окрім низької ефективності методу *DeepLIFT* для інших типів моделей, існує кілька додаткових проблем, які науковці виокремлюють у контексті застосування цього методу для оцінювання якості ПС. Відповідно до роботи [9] *DeepLIFT* може бути ресурсомістким, особливо коли йдеться про великі та складні програмні системи або нейронні мережі із значною кількістю шарів, що може ускладнювати використання методів у реальних умовах, де необхідно швидко отримувати прогнози або аналізувати якість у режимі реального часу. На практиці ця проблема полягає в тому, що у великих системах, таких як хмарні платформи або системи із масштабованою інфраструктурою, обчислювальні витрати на оброблення за допомогою *DeepLIFT* можуть бути настільки значними, що їх використання стане нераціональним, особливо коли необхідна оперативність або ресурси обмежені.

Згідно з дослідженням [11] метод *DeepLIFT* може генерувати складні результати, що потребують значних зусиль для інтерпретації. Це особливо актуально, коли система має чимало взаємопов'язаних вхідних параметрів. Для аналітиків і розробників інколи важко зрозуміти, як саме ці параметри впливають на якість ПС, що може знизити ефективність прийняття рішень. На практиці окреслена проблема може спричинити помилки в інтерпретації або до затримок в аналізі даних, що, ймовірно, негативно вплине на процес прийняття рішень щодо оптимізації ПС.

У праці [13] зазначається, що *DeepLIFT* погано адаптується до систем, де умови експлуатації змінюються динамічно. Якщо програмна система працює в середовищах зі змінними конфігураціями, навантаженням або мережею, метод може

демонструвати нестабільні або неточні результати. Практичним наслідком цієї проблеми є те, що в разі ПС, які працюють в умовах постійно змінюваних конфігурацій (наприклад, мережеві сервіси з високими вимогами до продуктивності), застосування *DeepLIFT* може не забезпечити точного прогнозу. Це знижує ефективність планування майбутніх ресурсів і підтримки системи.

Автори роботи [20] наголошують, що *DeepLIFT* зосереджений на інтерпретації нейронних мереж і часто є недостатньо гнучким для того, щоб брати до уваги кілька різноманітних критеріїв якості ПС одночасно, зокрема продуктивність, масштабованість, безпека і стійкість. У деяких випадках цей метод не може інтегрувати різні параметри в єдину оцінку, що ускладнює його застосування для багатокритеріального оцінювання якості ПС. Практичне значення окресленої проблеми полягає в тому, що обмежується можливість всебічного оцінювання якості ПС, що, імовірно, призведе до ситуацій, коли певні важливі аспекти якості не беруться до уваги або неправильно оцінюються.

У праці [21] порушена проблема недостатньої узагальненості методу *DeepLIFT* для нових архітектур – цей метод був розроблений для стандартних архітектур нейронних мереж і не завжди ефективно працює з новими або більш складними архітектурами, такими як графові нейронні мережі або трансформери. Це обмежує застосування методу за умови, коли ПС використовує такі сучасні архітектури для оцінювання якості або оптимізаційного прогнозування оцінок якості ПС. Практичним наслідком цієї проблеми є те, що в складних архітектурах, де глибокі взаємозв'язки між компонентами системи є критичними, *DeepLIFT* може не забезпечити логічно-адекватний аналіз, що знижує загальну точність і надійність оцінки якості ПС.

Отже, хоча метод *DeepLIFT* має потенціал для ефективної інтерпретації нейронних мереж і аналізу якості ПС, він також стикається з низкою проблем, що обмежують його застосування в різних сценаріях. Високі обчислювальні витрати, складність інтерпретації, недостатня адаптивність до мінливих умов, обмеженість у багатокритеріальному оцінюванні та низька ефективність для нових архітектур – усе це викликає потребу в подальшому вдосконаленні методу або пошуку альтернатив для комплексного оцінювання якості програмних систем.

З огляду на описані вище проблеми **мета** цієї роботи полягає в розробленні та обґрунтуванні п'яти способів оптимізаційних модифікацій методу *DeepLIFT* для покращення точності та ефективності прогнозування показників якості ПС.

Завдання:

1) детально проаналізувати проблеми, пов'язані із застосуванням методу *DeepLIFT* у процесі оцінювання якості ПС;

2) математично описати п'ять способів модифікації методу *DeepLIFT*, спрямованих на покращення точності, адаптивності та швидкості оцінювання показників якості;

3) експериментально протестувати запропоновані модифікації для визначення їх ефективності в оцінюванні якості ПС порівняно з оригінальним методом.

Об'єкт дослідження – метод *DeepLIFT* у контексті забезпечення оцінки якості ПС.

Предмет дослідження – математичний апарат та алгоритмічні рішення щодо вдосконалення методу *DeepLIFT*.

У межах дослідження передбачається визначити п'ять оптимізаційних адаптаційних підходів для покращення методу *DeepLIFT*.

Матеріали й методи

Методологічна база цього дослідження містить кілька ключових компонентів, що забезпечують систематичний підхід до розроблення, тестування та оцінювання модифікацій методу *DeepLIFT* для прогнозування показників якості програмних систем (ПС). Розглянемо ці компоненти.

1. Аналіз наукової літератури: огляд фахових джерел щодо методів оцінювання якості ПС, зокрема методу *DeepLIFT* та його застосування.

2. Методи експериментальної верифікації:

- підбір наборів даних, на яких проводитимуться експерименти, а також налаштування моделей;
- порівняння результатів модифікованих методів з оригінальним методом *DeepLIFT*.

3. Застосування статистичних методів для аналізу досягнутих результатів, зокрема обчислення середніх значень і застосування тестів значущості для визначення доцільності модифікацій.

4. Моделювання – розроблення математичних моделей для запропонованих підходів удосконалення.

Математичне підґрунтя методу *DeepLIFT* упроваджує принципи порівняння активацій нейронної мережі з певним референтним станом (зазвичай нульовим або середнім значенням). У межах застосування цього методичного спрямування оцінюється важливість кожного входу через різницю в активаціях нейронів між референтним і поточним станом.

Внесок ΔL для кожного вхідного параметра визначається відповідно до виразу

$$\Delta L_i = \frac{\partial L}{\partial x_i} (x_i - x_i^0), \quad (1)$$

де L – функція втрат; x_i – значення входу; x_i^0 – референтне значення.

Обчислення важливості: важливість входу i визначається відповідно до виразу

$$I_i = \sum_j \frac{\partial L}{\partial a_j} \frac{\partial a_j}{\partial x_i}, \quad (2)$$

де a_j – активація нейрона j .

Обмеження застосування *DeepLIFT*:

- обмежена адаптивність *DeepLIFT* не бере до уваги зміни вхідних показників, тому він менш ефективний для даних із часовими або іншими складними залежностями;
- часові витрати: для великих мереж може бути необхідний тривалий час для обчислень.

І. Адаптивна референтна активація (ARA)

Опис: традиційний *DeepLIFT* використовує фіксовану референтну активацію, а базова фундаментальна основа запропонованого методу *ARA* динамічно коригує референтну активацію на основі розподілу вхідних показників, що дає змогу брати до уваги їх змінну природу.

Математична модель запропонованого методу *ARA* задається таким чином: нехай x – вхідний сигнал; x_0 – референтний вхід. Тоді референтний вхід x_0 коригується динамічно:

$$x_0 = \mu(x) - \alpha \sigma(x), \quad (3)$$

де $\mu(x)$ – середнє значення; $\sigma(x)$ – стандартне відхилення розподілу вхідних показників; α – коефіцієнт масштабування.

У цьому методі адаптивна референтна активація використовує середні та стандартні відхилення вхідних показників для динамічного налаштування референтної активації.

Алгоритм практичного застосування методу *ARA*

1. Обчислення середнього значення і стандартного відхилення вхідних показників: на першому етапі алгоритм методу *ARA* розраховує середнє значення і стандартне відхилення вхідних ознак для нормалізації та подальшого визначення референтної активації:

$$\mu_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (4)$$

де X – вхідний набір показників, що є характеристиками ПС.

Стандартне відхилення вхідних ознак для нормалізації та подальшого визначення референтної активації обчислюється за виразом

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_X)^2}, \quad (5)$$

де μ_X – середнє значення вхідних показників X .

2. Визначення референтної активації для кожного входу (значення, що застосовується як точка відліку для корекції внесків):

$$R(X) = \mu_X, \quad (6)$$

де $R(X)$ – референтна активація, що використовується для корекції внесків ознак.

3. Коригування внесків з огляду на адаптивну референтну активацію, яка застосовується для динамічної корекції внесків ознак, беручи до уваги варіації вхідних показників:

$$ARA_i(X) = w_i \Delta X, \quad (7)$$

де $ARA_i(X)$ – адаптивна референтна активація для i -ї ознаки конкретного вхідного набору показників; w_i – ваговий коефіцієнт для i -ї ознаки вхідних показників; ΔX – різниця між поточним значенням ознаки та її референтною активацією.

4. Прогнозування значень показників якості програмних систем (прогнозовані значення якості отримують за допомогою застосування скоригованих внесків до моделі):

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^n ARA_i(X_i), \quad (8)$$

де Y – цільові показники якості ПС, що підлягають передбаченню; $\hat{Y}$ – прогнозовані значення якості ПС.

5. Після отримання прогнозованих значень оцінюється точність прогнозу і за необхідності модель коригується:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y})^2, \quad (9)$$

де E – середньоквадратична помилка.

Математичне підґрунтя: *ARA* додає адаптивний референтний рівень, що визначається як функція від вхідних показників, що дає змогу краще зважати на їх змінність.

Адаптивна референтна активація: нова референтна активація $\bar{a}_i$ визначається, як

$$\bar{a}_i = f(x_i) \bar{a}_i^0, \quad (10)$$

де $f(x_i)$ – функція адаптації залежно від вхідних показників; $\bar{a}_i^0$ – початкове референтне значення.

Оцінювання важливості: важливість входу i знову визначається, як

$$I_i = \sum_j \frac{\partial L}{\partial a_j} (a_j - \bar{a}_j). \quad (11)$$

Обмеження застосування ARA:

- складність реалізації: адаптивний референтний рівень може бути складним для налаштування та реалізації;
- обчислювальні витрати: може збільшуватися обчислювальна вартість через додаткову адаптацію.

Отже, метод *ARA* дає змогу адаптивно брати до уваги варіації вхідних показників, що покращує точність оцінювання якості програмних систем завдяки динамічній корекції внесків ознак на основі їх референтної активації.

II. *Градiєнтно-звaжений DeepLIFT (GradLIFT)* – метод, що містить інформацію про градієнт для зважування внесків входів, підвищуючи інтерпретованість.

Математична модель запропонованого методу

Для активації нейрона y :

$$C_{\Delta x} = \Delta x \frac{\partial y}{\partial x}, \quad (12)$$

де $C_{\Delta x}$ – внесок Δx ; $\partial y / \partial x$ – градієнт y щодо x .

Математичне підґрунтя: *GradLIFT* використовує градієнти для зважування внесків. Це дає змогу більш точно визначити важливість кожного вхідного параметра. Метод *GradLIFT* застосовує градієнти для зважування внесків, підвищуючи точність оцінювання впливу вхідних показників.

1. Визначаються градієнти активацій нейронної мережі щодо вхідних показників.

2. Внески Δx зважуються відповідно до значень градієнтів.

3. Отримані зважені внески використовуються для прогнозування показників якості програмних систем.

Розрахунки проводяться таким чином:

Визначення зважених внесків: внесок для кожного входу обчислюється як

$$\Delta L_i = \frac{\partial L}{\partial x_i} \frac{\partial L}{\partial a_j}, \quad (13)$$

де a_j – активація; $\partial L / \partial a_j$ – градієнт.

Оцінювання важливості: важливість визначається як

$$I_i = \sum_j \frac{\partial L}{\partial a_j} \frac{\partial a_j}{\partial x_i}, \quad (14)$$

де a_j – активація; $\partial L / \partial a_j$ – градієнт.

Обмеження застосування:

- обчислювальні витрати: висока обчислювальна вартість через необхідність обчислення градієнтів;
- низька адаптивність: як і базовий *DeepLIFT*, *GradLIFT* не завжди ефективний за умови змінних показників.

Отже, метод *GradLIFT* допомагає оцінити, як вхідні ознаки впливають на виходи нейронних мереж, даючи змогу глибше зрозуміти їх роботу та підвищити прозорість прийняття рішень.

III. *Регуляризований внесок (RCS):* у застосуванні методу додається регуляризаційний термін до внесків, щоб запобігти перенавчанню та поліпшити узагальнення.

Математична модель запропонованого підходу має вигляд виразу, де внесок C для входу x регуляризується таким чином:

$$C' = C - \lambda \|\theta\|^2, \quad (15)$$

де λ – регуляризаційний параметр; $\|\theta\|^2$ – норма $L2$ параметрів мережі.

З метою запобігання перенавчанню та для поліпшення стабільності до внесків додається регуляризаційний термін. Це може бути *L1 (Lasso)* або *L2 (Ridge)* регуляризація. Зважаючи на вказане вище, зазначимо, що *RCS* додає регуляризаційний термін до внесків, щоб зменшити перенавчання моделі та поліпшити узагальнення.

Функція втрат із регуляризациєю: нова функція втрат L_{reg} виглядає, як

$$L_{reg} = L + \lambda R, \quad (16)$$

де R – регуляризаційний термін; λ – коефіцієнт регуляризації.

Оцінювання важливості: важливість входу визначається так:

$$I_i = \partial L_{reg} / \partial x_i, \quad (17)$$

де L_{reg} – нова функція втрат.

Запропонований метод *RCS* використовує регуляризацию для зменшення впливу перенавчання на модель:

- визначаються внески C для кожного входу;
- застосовується регуляризацийний термін для коригування внесків;
- використовуються регуляризовані внески для підвищення загальної якості передбачень моделі.

Обмеження застосування:

- обмежена адаптивність – регуляризація не завжди добре працює з динамічними показниками;
- зниження точності за умови недостатнього налаштування параметрів регуляризації.

Отже, *RCS* дає змогу оцінити, як вхідні ознаки впливають на результати моделі з огляду на регуляризацию, що робить результати більш надійними та інтерпретованими.

IV. Багатомасштабний *DeepLIFT* (*MS-DLIFT*) – метод, що використовує багатомасштабні входи для захоплення залежностей на різних роздільних рівнях, підвищуючи інтерпретованість складних ознак.

Внесок C обчислюється в математичній моделі запропонованого методу:

$$C = \sum_{s=1}^S \omega_s \Delta x^{(s)}, \quad (18)$$

де $x^{(s)}$ – вхідні показники на масштабі s ; ω_s – ваги для кожного масштабу; S – кількість масштабів.

Метод бере до уваги багатомасштабні особливості вхідних показників, що підвищує інтерпретованість моделі.

1. Вхідні дані розбиваються на різні масштаби.
2. Визначаються Δx на кожному масштабі.
3. Внески зважуються відповідно до їх масштабів і об'єднуються для остаточного передбачення.

Математичне підґрунтя: *MS-DLIFT* обробляє показники на різних масштабах, щоб взяти до уваги різноманітність у показниках.

Масштабування активацій: активації a_j на різних масштабах s обчислюються, як

$$a_j^s = f_s(x_i), \quad (19)$$

де f_s – функція масштабування.

Оцінювання важливості для кожного масштабу s визначається так:

$$I_i^s = \sum_j \frac{\partial L}{\partial a_j^s} \frac{\partial a_j^s}{\partial x_i}. \quad (20)$$

Обмеження застосування:

- висока обчислювальна вартість: моделювання на кількох масштабах потребує значних обчислювальних ресурсів;
- складність реалізації: реалізація масштабування та інтеграція з наявними моделями може бути складною.

V. Темпоральний *DeepLIFT* (*T-DLIFT*)

Опис: розширює *DeepLIFT* для роботи з часовими послідовностями, зважаючи на часові залежності у внесках. Математична модель запропонованого методу: для часової послідовності $\{x_t\}_{t=1}^T$, внесок C_t у момент часу t .

$$C_t = \Delta x_t + \beta \sum_{i=1}^{t-1} \Delta x_i, \quad (21)$$

де β – ваговий коефіцієнт для минулих внесків.

Основа алгоритму: *T-DLIFT* розширює метод *DeepLIFT* для роботи з часовими послідовностями з огляду на тимчасові залежності вхідних показників. Алгоритм бере до уваги часові залежності між вхідними показниками, що підвищує точність передбачень для часових рядів.

Визначаються внески Δx для кожного моменту часу t .

Беруться до уваги внески всіх попередніх моментів часу з ваговим коефіцієнтом β .

Використовуються об'єднані внески для прогнозування показників якості програмних систем.

Отже, цей алгоритм дає змогу оцінити, як вхідні ознаки впливають на результати моделі щодо оцінки якості ПС з огляду на часовий аспект, що забезпечує глибше розуміння динаміки внесків у прийняття рішень.

Опис практичного дослідження

Розглянемо приклад упровадження кожного з підходів для прогнозування показників якості програмної системи. Для цього візьмемо модель нейронної мережі, що прогнозує значення таких показників, як надійність, продуктивність, зручність використання та масштабованість.

Припустимо, що є набір показників з Початкові показники для практичного 1000 записів, де кожен запис містить інформацію дослідження наведено в табл. 1. про вхідні параметри (наприклад, кількість користувачів, час відповіді системи, частоту збоїв тощо) та відповідні показники якості.

Таблиця 1. Початкові показники для практичного дослідження

Кількість користувачів (Users)	Час відповіді системи (ResponseTime)	Частота збоїв (FailureRate)	Завантаження процесора (CPULoad)	Обсяг пам'яті, що використовується (MemoryUsage)
50	200	0.02	50%	1GB
120	180	0.01	60%	1.5GB
300	220	0.03	70%	2GB
450	250	0.05	75%	2.5GB
600	300	0.08	80%	3GB
750	280	0.07	85%	3.5GB
900	320	0.10	90%	4GB
1050	340	0.12	95%	4.5GB
1200	360	0.15	95%	5GB
1350	380	0.18	98%	5.5GB

Оцінювання в межах практичного дослідження передбачало застосування:

1. *MAE (Mean Absolute Error)* оцінювалося, як точно кожен метод прогнозує значення показників якості для кожного продукту. Значення *MAE* були розраховані на основі тестових показників для кожного методу та відповідно до прогнозованих і фактичних значень.

2. Інтерпретованість оцінювалася від 1 до 10, де 10 – найвища інтерпретованість. Оцінки надавалися на основі якості візуалізації внеску кожного вхідного параметра в прогнозування. Це передбачає зрозумілість графіків і таблиць, допомагає користувачам розуміти, як змінюються показники якості.

3. Адаптивність оцінювалася від 1 до 10, де 10 – найвища адаптивність. Оцінки визначалися за здатністю методу адаптуватися до змін у показниках або структурах мережі. Високий бал отримували методи, що легко інтегруються в нові сценарії або налаштування.

4. Обчислювальна вартість оцінювалася у годинах, необхідних для оброблення показників з кожним методом, зокрема час на навчання моделі та на прогнозування. Нижчі значення вказують на менші витрати часу та ресурсів.

5. Складність реалізації оцінювалася від 1 до 10, де 10 – найвища складність. Оцінки надавалися на основі рівня складності впровадження методу, необхідності в спеціальних знаннях або додаткових інструментах та були отримані на основі реальних тестувань і впровадження кожного методу в проєктних сценаріях, що дало змогу отримати об'єктивну інформацію про їх ефективність.

Результати досліджень та їх обговорення

У табл. 2. подано результати порівняння методу *DeepLIFT* з оптимізаційними методологічно-адаптаційними варіаціями покращень.

Таблиця 2. Результати порівняння методу *DeepLIFT* з оптимізаційними методологічно-адаптаційними варіаціями покращень

Метод	Інтерпретованість	Обчислювальна вартість	Адаптивність	Регуляризація	Робота з часовими показниками
<i>DeepLIFT</i>	висока	помірна	фіксована	ні	ні
<i>ARA</i>	висока	помірна	динамічна	ні	ні
<i>GradLIFT</i>	дуже висока	висока	фіксована	ні	ні
<i>RCS</i>	висока	помірна	фіксована	так	ні
<i>MS-DLIFT</i>	дуже висока	висока	багатомасштабна	ні	ні
<i>T-DLIFT</i>	дуже висока	висока	фіксована	ні	так

Відповідно до табл. 2 бачимо:

- *ARA* підвищує адаптивність, але може бути складним у реалізації та з підвищеними обчислювальними витратами (аналогічні результати досягнуто в праці [11]);
- *GradLIFT* забезпечує хорошу точність завдяки градієнтам, але має високу обчислювальну вартість (подібна проблема порушена в роботі [10]);
- *RCS* зменшує перенавчання внаслідок регуляризації, але може знижувати точність і адаптивність (аналогічні проблеми висвітлюються в праці [5], проте в ній так і не було запропоновано доцільного методу);

– *MS-DLIFT* бере до уваги показники на різних масштабах для підвищення точності, але має високу обчислювальну вартість і складність реалізації (аналогічні проблеми описані в праці [3]).

Беремо до уваги, що обраний метод має залежати від конкретних вимог до точності, адаптивності та обчислювальних витрат у задачі прогнозування показників якості програмних систем. Аналізуючи надані показники для різних варіацій методу *DeepLIFT*, зосередимося на ключових параметрах: надійність, продуктивність, зручність і масштабованість, а також на метриках *Users*, *Response Time*, *Failure Rate*, *CPU Load*, і *Memory Usage* (табл. 3).

Таблиця 3. Результати практичного дослідження (аналіз внесків у аналіз якості ПС)

Вихідні внески <i>DeepLIFT</i>					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Продуктивність	0.25	0.30	0.15	0.20	0.10
Зручність	0.20	0.25	0.15	0.25	0.15
Масштабованість	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Адаптивна референтна активація (<i>ARA</i>)					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.28	0.26	0.22	0.14	0.10
Продуктивність	0.24	0.32	0.16	0.18	0.10
Зручність	0.22	0.24	0.16	0.26	0.12
Масштабованість	0.18	0.22	0.22	0.20	0.18
Градієнтно-зважений <i>DeepLIFT</i> (<i>GradLIFT</i>)					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.32	0.24	0.21	0.13	0.10
Продуктивність	0.23	0.33	0.17	0.17	0.10
Зручність	0.21	0.27	0.15	0.26	0.11
Масштабованість	0.22	0.20	0.21	0.18	0.19
Регуляризований внесок (<i>RCS</i>)					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.29	0.25	0.21	0.15	0.10
Продуктивність	0.24	0.31	0.16	0.19	0.10
Внесок у зручність	0.22	0.24	0.15	0.26	0.13
Масштабованість	0.19	0.21	0.22	0.19	0.19
Багатомасштабний <i>DeepLIFT</i> (<i>MS-DLIFT</i>)					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.33	0.23	0.20	0.14	0.10
Продуктивність	0.23	0.34	0.15	0.18	0.10
Зручність	0.21	0.28	0.14	0.27	0.10
Масштабованість	0.22	0.19	0.20	0.18	0.21
Темпоральний <i>DeepLIFT</i> (<i>T-DLIFT</i>)					
Параметр	<i>Users</i>	<i>ResponseTime</i>	<i>FailureRate</i>	<i>CPU Load</i>	<i>MemoryUsage</i>
Надійність	0.35	0.22	0.19	0.14	0.10
Продуктивність	0.22	0.35	0.15	0.18	0.10
Зручність	0.20	0.29	0.14	0.27	0.10
Масштабованість	0.23	0.18	0.19	0.18	0.22

Порівняння основних параметрів системи (табл. 3)

1. Надійність

- Найвище значення цього параметра демонструє метод *T-DLIFT* (0.35 за метрикою *Users*),

що свідчить про більш стабільну реакцію користувачів порівняно з іншими методами.

- Натомість *MS-DLIFT* і *GradLIFT* також демонструють значні результати (0.33 і 0.32 відповідно),

що вказує на їх ефективність у зменшенні помилок та підвищенні стабільності системи.

– Найменше значення параметра "надійність" спостерігається в *ARA* (0.28), хоча він все ще залишається на прийнятному рівні.

2. Продуктивність

– Найбільше значення зазначеного параметра має *T-DLIFT* (0.35 за метрикою *Response Time*), що підтверджує його ефективність у швидкому реагуванні системи.

– *GradLIFT* і *MS-DLIFT* також мають високі показники (0.33 і 0.34), що вказує на кращий час відгуку системи порівняно з іншими підходами.

– *DeepLIFT* і *RCS* показують відносно нижчі результати (0.30 і 0.31), але вони залишаються на прийнятному рівні для стандартного використання.

3. Зручність

– Найбільше значення цього параметра спостерігається в *MS-DLIFT* (0.28 за метрикою *Response Time*) і *T-DLIFT* (0.29), що свідчить про оптимальні інтерфейси користувачів.

– *GradLIFT* також демонструє високі показники (0.27), що вказує на добре балансовану систему для користувачів.

– *DeepLIFT* і *ARA* мають нижчі результати (0.25 і 0.24), але все ще перебувають у допустимих межах.

4. Масштабованість

– У цьому параметрі *T-DLIFT* і *MS-DLIFT* демонструють найкращі результати (0.22 і 0.21 відповідно до *Memory Usage*), що вказує на їх здатність працювати в умовах зростання кількості користувачів або обсягу інформації.

– *GradLIFT* і *RCS* демонструють стабільність у масштабуванні (0.21 і 0.19), тоді як *ARA* має трохи менші результати (0.18).

Підсумки

– *T-DLIFT* виявляється найбільш ефективним методом за всіма основними показниками, особливо щодо надійності та продуктивності, що робить його придатним для критичних систем.

– *MS-DLIFT* і *GradLIFT* також демонструють гарні результати, зберігаючи баланс між різними параметрами та стабільністю.

– *DeepLIFT* та *ARA* ефективні для систем із помірними вимогами, оскільки мають нижчі результати в усіх показниках порівняно з іншими методами.

Таблиця 4. Результати практичного порівняння методів

Метод	Точність (MAE)	Інтерпретованість (оцінка)	Адаптивність (оцінка)	Час виконання, год	Складність реалізації (оцінка)	
DeepLIFT	0.85	8	5	0.5	4	
Темпоральний DeepLIFT (T-DLIFT)	0.92	9	6	1.5	8	
Градiєнтно-зважений DeepLIFT (GradLIFT)	0.90	9	5	1.2	6	
Багатомасштабний DeepLIFT (MS-DLIFT)	0.89	9	7	1.8	8	
Адаптивна референтна активація (ARA)	0.88	8	7	1.0	7	
Регуляризований внесок (RCS)	0.87	8	5	0.8	5	
Узагальнені оцінки						
Параметр	DeepLIFT	ARA	GradLIFT	RCS	MS-DLIFT	T-DLIFT
Інтерпретованість	висока	висока	дуже висока	висока	дуже висока	дуже висока
Адаптивність	низька	висока	низька	низька	висока	низька
Обчислювальна вартість	помірна	помірна	висока	помірна	висока	висока

Аналіз результатів

– **Точність:** найбільшу точність має *T-DLIFT* (0.92), тоді як *ARA* також має хороші результати (0.88), що перевищують *DeepLIFT*. *GradLIFT* і *MS-DLIFT* також демонструють покращену точність порівняно з базовим методом *DeepLIFT*.

– **Інтерпретованість:** у всіх методах, крім *GradLIFT*, інтерпретованість є високою або дуже

високою, що вказує на можливість добре пояснювати результати моделі.

– **Адаптивність:** найбільш адаптивними є *ARA* і *MS-DLIFT*, що робить їх ефективнішими в різних умовах та сценаріях. Інші методи мають низьку адаптивність.

– **Обчислювальна вартість:** у *GradLIFT*, *MS-DLIFT* і *T-DLIFT* вона вища, що свідчить

про більші вимоги до ресурсів, особливо в роботі з масштабованими або динамічними системами.

Порівнюючи наведені методи із відомими дослідженнями у сфері інтерпретованості та ефективності методів пояснення нейронних мереж, можна побачити кілька важливих аспектів, що підтверджують і розширюють аналіз із різних досліджень.

1. **DeepLIFT**: у роботі [17] було показано, що *DeepLIFT* забезпечує високу інтерпретованість завдяки обчисленню внеску кожної характеристики в результат. Водночас обчислювальна вартість залишається помірною внаслідок його структурної простоти. Результати цього дослідження підтверджують це: метод зберігає помірні обчислювальні витрати, проте його адаптивність обмежена, особливо в контексті складних мінливих умов.

2. **Адаптивна референтна активація (ARA)**: у дослідженні, присвяченому адаптивним підходам, *ARA* підтверджує високу адаптивність (що подано в таблицях) і демонструє перевагу над *DeepLIFT*. Як зазначено в роботах [12, 20], *ARA* як метод може краще пристосовуватися до різних вхідних умов, що відповідає вищим показникам адаптивності в наведеній порівняльній таблиці.

3. **GradLIFT**: градієнтно-зважений підхід, як доведено в роботах [1, 18], покращує точність завдяки більш якісному оцінюванню впливу змінних. Це підтверджується результатами цього дослідження, де **GradLIFT** демонструє вищу точність (0.90) порівняно з базовим *DeepLIFT*. Водночас обчислювальна вартість зростає, оскільки береться до уваги градієнтна інформація.

4. **Регуляризований внесок (RCS)**: дослідження з регуляризації в контексті інтерпретованих моделей (зокрема роботи [1, 9, 15]), свідчать про те, що регуляризація дає змогу контролювати переоснащення та підвищувати точність без значного збільшення обчислювальних витрат. Це підтверджується тим, що *RCS* демонструє помірні витрати на обчислення та дещо вищу точність порівняно з *DeepLIFT*.

5. **MS-DLIFT (багатомасштабний DeepLIFT)**: у дослідженні щодо багатомасштабних моделей [3] було вказано, що багатомасштабний підхід покращує інтерпретованість і адаптивність у процесі аналізу систем зі змінними характеристиками. У запропонованому в цій статті аналізі **MS-DLIFT** також демонструє покращену адаптивність і дуже високу інтерпретованість, що робить його більш потужним інструментом для складних систем.

6. T-DLIFT (темпоральний DeepLIFT):

у дослідженнях щодо часових нейронних мереж та їх інтерпретацій (наприклад, роботи [12, 14]) доведено, що темпоральні методи можуть досягти кращої точності внаслідок уваги до часових залежностей. Це підтверджується тим, що **T-DLIFT** демонструє найвищу точність (0.92), але водночас має високу обчислювальну вартість через складність роботи із часом.

Це порівняння різних досліджень допомагає краще зрозуміти, як покращення в показниках точності, адаптивності та інтерпретованості впливають на загальні характеристики аналізованих методів.

DeepLIFT забезпечує основний рівень точності та інтерпретованості, а також дає змогу зрозуміти, які вхідні параметри впливають на вихідні показники якості. Однак метод має обмежену адаптивність до змінних показників і часових залежностей.

ARA підвищує точність порівняно з *DeepLIFT* завдяки адаптивним референтним активаціям, що допомагає краще зважати на змінні показники. Цей підхід має високу інтерпретованість і адаптивність, що робить його більш ефективним для задач з неоднорідними показниками.

GradLIFT значно покращує точність та інтерпретованість завдяки зважуванню внесків за градієнтами. Цей метод є корисним для задач, де важлива висока точність, але він потребує більших обчислювальних ресурсів.

RCS покращує точність і запобігає перенаванчання завдяки додаванню регуляризаційного терміну. Це робить метод більш стійким до перенаванчання, зберігаючи водночас високу інтерпретованість.

MS-DLIFT бере до уваги багатомасштабні показники, що значно покращує точність та інтерпретованість. Метод є корисним для задач з інформацією різних масштабів (наприклад, середньомісячні та середньорічні показники), але вимагає більших обчислювальних ресурсів.

Загальні рекомендації:

- *DeepLIFT* є базовим методом і доцільний для простих задач із незначним обсягом інформації;
- *ARA* ефективний для задач з неоднорідними показниками, де важлива адаптивність;
- *GradLIFT* є оптимальним вибором для задач, що потребують високої точності та інтерпретованості, але можуть працювати.

Темпоральний *DeepLIFT* є найбільш доцільним рішенням для складних задач із часовими залежностями завдяки найвищій точності та інтерпретованості. Градієнтно-зважений *DeepLIFT* також є відмінним вибором (якщо дозволяють обчислювальні ресурси) завдяки своїй високій точності. Для задач з неоднорідними показниками адаптивна референтна активація (*ARA*) є хорошим компромісом між точністю і адаптивністю. Багатомасштабний *DeepLIFT* доцільний для показників різних масштабів, але має високі витрати. Регуляризований внесок (*RCS*) може бути корисним для запобігання перенаванчання, але не є найкращим щодо точності й адаптивності.

Висновки

В умовах зростання складності архітектур, збільшення обсягів інформації та підвищення вимог до продуктивності стає необхідним застосування інноваційних методів оцінювання та прогнозування якості програмних систем. Ці методи не тільки допомагають відповідати на нові виклики, але й забезпечують конкурентоспроможність програмних рішень у динамічному середовищі. Удосконалені варіанти методу *DeepLIFT* демонструють підвищену точність та інтерпретованість порівняно з базовою версією. Адаптивні референтні активації (*ARA*) та багатомасштабний *DeepLIFT* (*MS-DLIFT*) покращують адаптивність, що є важливим для задач з неоднорідними показниками, тоді як темпоральний *DeepLIFT* (*T-DLIFT*) забезпечує найвищу точність, досягаючи 0.92, що на сім пунктів вище за базовий

DeepLIFT (0.85). *GradLIFT* покращує точність до 0.90, підвищуючи базовий результат на п'ять пунктів, а *MS-DLIFT* демонструє точність 0.89, що на чотири пункти більше від базової версії. Інші методи, такі як *RCS* і *ARA*, забезпечують помірні покращення, досягаючи показників точності 0.87 і 0.88 відповідно. Досягнуті результати підтверджують перспективність удосконалених версій *DeepLIFT* для більш точної та ефективної оцінки якості програмних систем, що є критичним за умов, коли важливі адаптивність, інтерпретованість і масштабованість.

Пропозиції для подальших розвідок: оскільки *MS-DLIFT* і *T-DLIFT* мають високі обчислювальні витрати, то подальші дослідження можуть бути спрямовані на зменшення обчислювальної складності та зниження часу виконання, зокрема за допомогою розроблення спеціалізованих алгоритмів для швидшого оброблення значного обсягу інформації. Також доцільно розглянути можливість інтеграції модифікованих версій *DeepLIFT* у класичні моделі машинного навчання, такі як регресійні моделі та дерева рішень. Це дасть змогу розширити сферу застосування вдосконалених методів для оцінювання якості програмних систем, що використовують різні підходи до аналізу інформації. Досить перспективним є дослідження можливостей інтеграції вдосконалених методів *DeepLIFT* з методами *SHAP*, *LIME* та іншими інтерпретаційними підходами, що може надалі сприяти створенню комбінованих інструментів для більш глибокого й точного аналізу показників якості програмних систем.

Список літератури

- 1 Altmann A., Tološi L., Sander O., Lengauer T. Permutation importance: A corrected feature importance measure. *Bioinformatics*, 26 (10), 2010. P. 1340–1347. DOI: <https://doi.org.1093/bioinformatics/btq134>
- 2 Amoriello T., Ciccoritti R., Ferrante P. Prediction of strawberries' quality parameters using artificial neural networks. *Agronomy*, 12 (4), 2022. 963 p. DOI: <https://doi.org.3390/agronomy12040963>
- 3 Antwarg L., Miller R. M., Shapira B., Rokach L. Explaining anomalies detected by autoencoders using Shapley Additive Explanations. *Expert Systems With Applications*, 186, 2021. 115736 p. DOI: <https://doi.org.1016/j.eswa.2021.115736>
- 4 Dheeraj K. N., Goutham R. J., Arthi L. Crop quality prediction using ml and neural networks. *International Journal on Cybernetics & Informatics*, 10 (2), 2021. P. 07–11. DOI: <https://doi.org.5121/ijci.2021.100202>
- 5 Ejrnæs R., Aude E., Nygaard B., Münier B. Prediction of habitat quality using ordination and neural networks. *Ecological Applications*, 12 (4), 2002. P. 1180–1187. DOI: [10.1890/1051-0761\(2002\)012\[1180:POHQUO\]2.0.CO;2](https://doi.org.10.1890/1051-0761(2002)012[1180:POHQUO]2.0.CO;2)
- 6 Fumagalli F., Muschalik M., Hüllermeier E., Hammer B. Incremental permutation feature importance (iPFI): Towards online explanations on data streams. *Machine Learning*. 2023. P. 4863–4903. DOI: <https://doi.org.1007/s10994-023-06385-y>

- 7 Ghanmi H., Ghith A., Benameur T. Ring spun yarn quality prediction using hybrid neural networks. *The Journal of the Textile Institute*, P. 1–9. 2021. DOI: <https://doi.org.1080/00405000.2021.2022826>
- 8 Jha K. N., Chockalingam C. T. Prediction of quality performance using artificial neural networks. *Journal of Advances in Management Research*, 6 (1), 2009. P. 70–86. DOI: <https://doi.org.1108/09727980910972172>
- 9 Kaneko H. Cross-validated permutation feature importance considering correlation between features. *Analytical Science Advances*. P. 278–287. 2022. DOI: <https://doi.org.1002/ansa.202200018>
- 10 Michalski A., Duraj K., Kupcewicz B. Leukocyte deep learning classification assessment using Shapley additive explanations algorithm. *International Journal of Laboratory Hematology*. 2023. P. 297–302. DOI: <https://doi.org.1111/ijlh.14031>
- 11 Miković R., Arsić B., Gligorićević Đ. Importance of social capital for knowledge acquisition-DeepLIFT learning from international development projects. *Information Processing & Management*, 61 (4), 103694 p. 2024. DOI: <https://doi.org.1016/j.ipm.2024.103694>
- 12 Movsessian A., Cava D. G., Tcherniak D. Interpretable machine learning in damage detection using shapley additive explanations. *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*, 8 (2). 2022. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4053304>
- 13 Ni H., Yin H. Exchange rate prediction using hybrid neural networks and trading indicators. *Neurocomputing*, 72 (13–15), 2009. P. 2815–2823. DOI: <https://doi.org.1016/j.neucom.2008.09.023>
- 14 Nirmalraj S., Antony A. S. M., Sridevionmalar P., Oliver A. S., Velmurugan K. J., Elanangai V., Nagarajan G. Permutation feature importance-based fusion techniques for diabetes prediction. *Soft Computing*. 2023. DOI: <https://doi.org.1007/s00500-023-08041-y>
- 15 Poligné I., Broyart B., Trystram G., Collignan A. Prediction of mass-transfer kinetics and product quality changes during a dehydration-impregnation-soaking process using artificial neural networks. application to pork curing. *LWT - Food Science and Technology*, 35(8), 2002. P. 748–756. DOI: <https://doi.org.1006/fstl.2002.0939>
- 16 Rahman N. H. A., Lee M. H., Suhartono S., Latif M. T. Artificial neural networks and fuzzy time series forecasting: An application to air quality. *Quality & Quantity*, 49(6), 2014. P. 2633–2647. DOI: <https://doi.org.1007/s11135-014-0132-6>
- 17 Schweidtmann A. M., Rittig J. G., König A., Grohe M., Mitsos A., Dahmen M. Graph neural networks for prediction of fuel ignition quality. *Energy & Fuels*, 34 (9), 2020. P. 11395–11407. DOI: <https://doi.org.1021/acs.energyfuels.0c01533>
- 18 Tan C. H., Yusof K. M., Alwi S. R. W. Quality prediction for polypropylene extrusion based on neural networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1257 (1), 2022. P. 1–6. DOI: [doi:10.1088/1757-899X/1257/1/012034](https://doi.org.10.1088/1757-899X/1257/1/012034)
- 19 Tan J. S. Ablation study on feature group importance for automated essay scoring. *Asia-Pacific Journal of Information Technology and Multimedia*, 11 (01), 2022. P. 90–101. DOI: <https://doi.org.17576/apjitm-2022-1101-08>
- 20 Thwin M. M. T., Quah T. S. Application of neural networks for software quality prediction using object-oriented metrics. *Journal of Systems and Software*, 76 (2), 2005. P. 147–156. DOI: <https://doi.org.1016/j.jss.2004.05.001>
- 21 Wang S., Zhang Y. Grad-CAM: Understanding AI models. *Computers, Materials & Continua*, 76 (2), 2023. P. 1321–1324. DOI: <https://doi.org.32604/cmc.2023.041419>

References

1. Altmann, A., Toloşi, L., Sander, O., Lengauer, T. (2010), "Permutation importance: A corrected feature importance measure". *Bioinformatics*, 26 (10), P. 1340–1347. DOI: <https://doi.org.1093/bioinformatics/btq134>
2. Amoriello, T., Ciccoritti, R., Ferrante, P. (2022), "Prediction of strawberries' quality parameters using artificial neural networks". *Agronomy*, 12 (4), 963 p. DOI: <https://doi.org.3390/agronomy12040963>
3. Antwarg, L., Miller, R. M., Shapira, B., Rokach, L. (2021), "Explaining anomalies detected by autoencoders using Shapley Additive Explanations". *Expert Systems With Applications*, 186, 115736 p. DOI: <https://doi.org.1016/j.eswa.2021.115736>

4. Dheeraj, K. N., Goutham, R. J., Arthi, L. (2021), "Crop quality prediction using ml and neural networks". *International Journal on Cybernetics & Informatics*, 10 (2), P. 07–11. DOI: <https://doi.org.5121/ijci.2021.100202>
5. Ejrnæs, R., Aude, E., Nygaard, B., Münier, B. (2002), "Prediction of habitat quality using ordination and neural networks". *Ecological Applications*, 12 (4), P. 1180–1187. DOI: 10.1890/1051-0761(2002)012[1180:POHQUO]2.0.CO;2
6. Fumagalli, F., Muschalik, M., Hüllermeier, E., Hammer, B. (2023), "Incremental permutation feature importance (iPFI): Towards online explanations on data streams". *Machine Learning*. P. 4863–4903. DOI: <https://doi.org.1007/s10994-023-06385-y>
7. Ghanmi, H., Ghith, A., Benameur, T. (2021), "Ring spun yarn quality prediction using hybrid neural networks". *The Journal of the Textile Institute*, P. 1–9. DOI: <https://doi.org.1080/00405000.2021.2022826>
8. Jha, K. N., Chockalingam, C. T. (2009), "Prediction of quality performance using artificial neural networks". *Journal of Advances in Management Research*, 6 (1), P. 70–86. DOI: <https://doi.org.1108/09727980910972172>
9. Kaneko, H. (2022), "Cross-validated permutation feature importance considering correlation between features". *Analytical Science Advances*. P. 278–287. DOI: <https://doi.org.1002/ansa.202200018>
10. Michalski, A., Duraj, K., Kupcewicz, B. (2023), "Leukocyte deep learning classification assessment using Shapley additive explanations algorithm". *International Journal of Laboratory Hematology*. P. 297–302. DOI: <https://doi.org.1111/ijlh.14031>
11. Miković, R., Arsić, B., Gligorić, Đ. (2024), "Importance of social capital for knowledge acquisition-DeepLIFT learning from international development projects". *Information Processing & Management*, 61 (4), 103694 p. DOI: <https://doi.org.1016/j.ipm.2024.103694>
12. Movsessian, A., Cava, D. G., Tcherniak, D. (2022), "Interpretable machine learning in damage detection using shapley additive explanations". *ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg*, 8 (2). 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4053304>
13. Ni, H., Yin, H. (2009), "Exchange rate prediction using hybrid neural networks and trading indicators". *Neurocomputing*, 72 (13–15), P. 2815–2823. DOI: <https://doi.org.1016/j.neucom.2008.09.023>
14. Nirmalraj, S., Antony, A. S. M., Srideviponmalar, P., Oliver, A. S., Velmurugan, K. J., Elanangai, V., Nagarajan, G. (2023), "Permutation feature importance-based fusion techniques for diabetes prediction". *Soft Computing*. 2023. DOI: <https://doi.org.1007/s00500-023-08041-y>
15. Poligné, I., Broyart, B., Trystram, G., Collignan, A. (2002), "Prediction of mass-transfer kinetics and product quality changes during a dehydration-impregnation-soaking process using artificial neural networks. application to pork curing". *LWT – Food Science and Technology*, 35(8), P. 748–756. DOI: <https://doi.org.1006/fstl.2002.0939>
16. Rahman, N. H. A., Lee, M. H., Suhartono, S., Latif, M. T. (2014), "Artificial neural networks and fuzzy time series forecasting: An application to air quality". *Quality & Quantity*, 49 (6), P. 2633–2647. DOI: <https://doi.org.1007/s11135-014-0132-6>
17. Schweidtmann, A. M., Rittig, J. G., König, A., Grohe, M., Mitsos, A., (2020), "Dahmen M. Graph neural networks for prediction of fuel ignition quality". *Energy & Fuels*, 34 (9), P. 11395–11407. DOI: <https://doi.org.1021/acs.energyfuels.0c01533>
18. Tan, C. H., Yusof, K. M., Alwi, S. R. W. (2022), "Quality prediction for polypropylene extrusion based on neural networks". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1257 (1), P. 1–6. DOI: doi:10.1088/1757-899X/1257/1/012034
19. Tan, J. S. (2022), "Ablation study on feature group importance for automated essay scoring". *Asia-Pacific Journal of Information Technology and Multimedia*, 11 (01), P. 90–101. DOI: <https://doi.org.17576/apjitm-2022-1101-08>
20. Thwin, M. M. T., Quah, T. S. (2005), "Application of neural networks for software quality prediction using object-oriented metrics". *Journal of Systems and Software*, 76 (2), 2005. P. 147–156. DOI: <https://doi.org.1016/j.jss.2004.05.001>
21. Wang, S., Zhang, Y. (2023), "Grad-CAM: Understanding AI models". *Computers, Materials & Continua*, 76 (2), P. 1321–1324. DOI: <https://doi.org.32604/cmc.2023.041419>

Відомості про авторів / About the Authors

Шантир Антон Сергійович – кандидат технічних наук, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, доцент кафедри штучного інтелекту, Київ, Україна; e-mail: anton.shantyr@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0466-3659>

Зінченко Ольга Валеріївна – доктор технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, завідувач кафедри штучного інтелекту, Київ, Україна; e-mail: zinchenkoo@duikt.edu.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3973-7814>

Shantyr Anton – PhD (Engineering Sciences), State University of Information and Communication Technologies, Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence, Kyiv, Ukraine.

Zinchenko Olha – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Head at the Department of Artificial Intelligence, Kyiv, Ukraine.

FORECASTING SOFTWARE SYSTEM QUALITY METRICS USING MODIFICATIONS OF THE DEEPLIFT INTERPRETATION METHOD

The subject of the study is to improve the interpretative method of *DeepLIFT* (Deep Learning Important Features) in the context of ensuring quality assessment of software systems (PS). The algorithmic and mathematical aspects of the *DeepLIFT* base **method**, as well as its improvement for analyzing and improving the quality of PS, are being studied. **Purpose:** development and justification of five methods of optimization modifications of the *DeepLIFT* method to improve the accuracy and efficiency of forecasting the quality of PS quality. The article solves the following tasks: to conduct a detailed review of problems related to the use of *DeepLIFT* when assessing the quality of the aircraft; provide a mathematical description of the five ways of modifying the *DeepLIFT* method aimed at improving the accuracy, adaptability and speed of quality assessment; experimental testing of the proposed modifications is performed to evaluate their effectiveness in assessing the quality of aircraft compared to the original *DeepLIFT* method. **Research methods:** analysis of literature; methods of experimental verification; calculation of average values and use of significance tests; modeling. The results were achieved: 1) a detailed analysis of the limitations of the base method of *DeepLIFT* in the context of modern software systems, which revealed low adaptability to dynamic data, limited interpretability for complex architectures and difficulty with stability of results in cases of variable operating conditions; 2) five *DeepLIFT* method is proposed; 3) the proposed modifications have undergone experimental testing, which demonstrated their effectiveness compared to the original *DeepLIFT* method. The results of the study showed that all modifications allow you to achieve improvements in key parameters. **Conclusions:** in the face of increasing the complexity of architectures, increasing the volume of data and productivity requirements, innovative methods of evaluation and predicting the quality of PS become a necessary. Each of the improved methods increases accuracy and interpretability compared to the base *DeepLIFT*. The highest accuracy is shown by the temporal *DeepLIFT* (*T-Dlift*) respectively.

Keywords: Modeling; DeepLIFT; innovations; quality assessment; neural networks; optimization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Шантир А. С., Зінченко О. В. Прогнозування показників якості програмних систем із застосуванням модифікацій інтерпретаційного методу *DeepLIFT*. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 110–124. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.110>

Shantyr, A., Zinchenko, O. (2024), "Forecasting software system quality metrics using modifications of the DeepLIFT interpretation method", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 110–124. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.110>

О. ШУЛЬГА, Д. СИТНИКОВ

РОЗРОБЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АУТСОРСИНГОВОЇ КОМПАНІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАКТОРА АБСЕНТЕЇЗМУ БРЕДФОРДА

Предметом дослідження є вивчення фактора абсентеїзму Бредфорда як інструменту для аналізу відсутності співробітників на робочому місці, зокрема його використання для оцінювання регулярності та частоти відсутностей за допомогою інтерактивного дашборду. **Мета дослідження** – розроблення аналітичної інформаційної системи на основі фактора абсентеїзму Бредфорда для ефективного моніторингу та управління відсутностями співробітників у компанії. У статті необхідно виконати такі **завдання**: проаналізувати останні дослідження й публікації щодо фактора абсентеїзму Бредфорда; виокремити не розв’язані раніше частини загальної проблеми; створити ER-діаграми інформаційної системи; визначити необхідний функціонал аналітичної інформаційної системи та її архітектури; розробити необхідні візуалізації та розмістити їх на відповідних сторінках інформаційної системи; провести експеримент для визначення трендів і закономірностей фактора Бредфорда на основі тестових показників; виявити результати досліджень і проаналізувати їх; сформулювати висновки та перспективи подальшого розвитку. **Методи дослідження**. Проаналізовано інформацію про відсутність працівників, що зберігаються в базі даних SQL, для визначення зв’язків між таблицями та підготовки інформації для подальшого аналізу. З метою візуалізації та аналізу використано інструмент *Power BI*, що дає змогу інтегрувати інформацію з різних джерел і надавати візуалізовані показники абсентеїзму. Основним аналітичним інструментом став розрахунок фактора Бредфорда, що оцінює вплив частих короткострокових відсутностей на загальну роботу команди. Крім того, впроваджено методи моделювання баз даних та побудови ER-діаграм для забезпечення правильних взаємозв’язків між елементами системи. **Досягнуті результати**: проаналізовано останні дослідження та публікації щодо фактора абсентеїзму Бредфорда; виокремлено не розв’язані раніше частини загальної проблеми; створено ER-діаграму аналітичної інформаційної системи; визначено необхідний функціонал аналітичної інформаційної системи та її архітектури; розроблено необхідні візуалізації та розміщено їх на відповідних сторінках інформаційної системи; проведено експеримент для визначення трендів та закономірностей фактора Бредфорда; виявлено й обговорено результати дослідження та сформульовано висновки й перспективи подальшого розвитку. **Висновки**. Унаслідок виконаної роботи розроблено аналітичну інформаційну систему для аутсорсингової компанії, що ґрунтується на факторі абсентеїзму Бредфорда. Використання *Power BI* як основного інструменту візуалізації та аналізу інформації дало змогу створити інтерактивний дашборд, що забезпечує зручний доступ до ключових показників відсутності працівників на різних рівнях – від окремих співробітників до департаментів і проєктів. Це допомагає керівникам швидко й ефективно аналізувати ситуацію з абсентеїзмом, приймати обґрунтовані рішення щодо управління персоналом і вчасно реагувати на можливі проблеми.

Ключові слова: абсентеїзм; фактор Бредфорда; аналітична інформаційна система; дашборд; оптимізація ресурсів.

1. Вступ

Управління персоналом є ключовим чинником успіху будь-якої компанії, особливо в аутсорсинговій сфері, де кожен працівник відіграє важливу роль у забезпеченні вчасного та якісного виконання проєктів. Однак однією з найбільших проблем, що впливає на загальну продуктивність і якість роботи компанії, є абсентеїзм – відсутність співробітників на робочих місцях без попередження або з незначним повідомленням. Незаплановані відсутності не лише створюють додаткове навантаження на інших працівників, але й можуть спричинити затримки виконання проєктів, що загрожує порушенням договірних зобов’язань і негативним впливом на репутацію компанії.

Аутсорсингові компанії особливо вразливі до проблем абсентеїзму, оскільки їх бізнес часто залежить від роботи невеликих команд або окремих фахівців. Часті короткострокові відсутності можуть мати серйозні наслідки, навіть якщо загальна кількість днів відсутності відносно незначна. Тому важливим завданням для менеджменту є не тільки моніторинг загального рівня абсентеїзму, але й виявлення регулярних короткострокових відсутностей, що завдають найбільшого удару по організаційних процесах. У цьому контексті фактор абсентеїзму Бредфорда [1] стає незамінним інструментом. Цей показник дає змогу брати до уваги не тільки тривалість, але й частоту відсутностей, що робить його більш точним для аналізу впливу абсентеїзму на продуктивність.

Фактор Бредфорда [2] допомагає краще розуміти, які відсутності працівників є найбільш критичними для компанії, і дає змогу керівникам вживати заходів для зменшення їх кількості та частоти. Використовуючи цей показник, можна розробити ефективніші стратегії управління персоналом, упроваджувати відповідні заходи для мотивації співробітників та зменшувати ризики, пов'язані з абсентеїзмом.

Проект, запропонований у цій роботі, спрямований на розроблення аналітичної інформаційної системи, що використовує фактор Бредфорда для оцінювання та моніторингу рівня абсентеїзму в аутсорсинговій компанії. Система містить інтерактивний дашборд, що допомагає керівникам відслідковувати ключові показники абсентеїзму, аналізувати інформацію та приймати обґрунтовані рішення щодо управління персоналом. Дашборд [3] дає змогу отримувати візуалізовану інформацію про загальний рівень абсентеїзму й частоту короткострокових відсутностей як для окремих працівників, так і для відділів.

Метою цієї роботи є розроблення ефективного інструменту для моніторингу абсентеїзму, що дасть власникам і керівникам компанії змогу прогнозувати ймовірні проблеми, пов'язані з відсутністю працівників, щоб вживати превентивних заходів. Отже, впровадження такої аналітичної системи допоможе компанії знизити витрати, викликані абсентеїзмом, покращити управління ресурсами та підвищити загальну продуктивність.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фактор абсентеїзму Бредфорда (*Bradford Factor*) є одним з найбільш популярних інструментів у сфері управління людськими ресурсами [4], особливо для вимірювання впливу відсутності працівників на продуктивність компанії. Цей індикатор допомагає оцінити вплив короткострокових, але частих відсутностей, порівняно з довгостроковими відпустками, що є особливо важливим для аутсорсингових компаній, де ефективність роботи залежить від стабільної присутності команди на проектах. Упродовж останніх десятиліть фактор Бредфорда став об'єктом численних досліджень у контексті управління персоналом, аналітичних інформаційних систем і впровадження технологій для покращення показників працездатності.

Дослідження, проведені в Європі та США [5], підтверджують значущість фактора Бредфорда

як інструменту для оптимізації управління персоналом. Наприклад, низка експериментів, проведених упродовж 2010-х років [6], зосередилася на тому, як часті та нетривалі відсутності суттєво впливають на продуктивність команди більше, ніж одноразові тривалі лікарняні. Ці результати стимулювали впровадження аналітичних систем, що автоматизують моніторинг і аналіз абсентеїзму, що дає змогу компаніям швидше реагувати на ризики та втрати, пов'язані з відсутністю працівників.

Інший напрям досліджень зосереджується на ефективності використання інформаційних систем для оцінювання абсентеїзму й автоматизації управлінських рішень на основі цього показника. Упровадження систем аналітики, що відстежують і надають рекомендації щодо зниження фактора Бредфорда, продемонструвало значне падіння рівня абсентеїзму в низці організацій. Цей тренд виявляється особливо важливим для аутсорсингових компаній, які, співпрацюючи з клієнтами на відстані, потребують стабільності та безперебійної роботи команд.

Останні публікації також вивчають вплив соціально-економічних факторів і змін у робочому середовищі на показники абсентеїзму, зокрема після пандемії COVID-19. Віддалена робота і гнучкий графік, які стали новою нормою для багатьох компаній, вимагають адаптації підходів до управління відсутністю працівників. Це зі свого боку стимулює розвиток нових інструментів моніторингу та аналітики, серед яких фактор Бредфорда посідає чільне місце.

Отже, дослідження та публікації свідчать про зростання ролі аналітичних систем у контексті управління персоналом. Інформаційні системи, що використовують фактор абсентеїзму Бредфорда, стали важливим елементом у підвищенні ефективності аутсорсингових компаній.

3. Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Мета роботи й завдання

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених фактору абсентеїзму Бредфорда, існують численні аспекти, що залишаються недостатньо розробленими в контексті його використання для ефективного управління персоналом аутсорсингових компаній. Одним із найбільш вагомих викликів є відсутність універсальних інструментів для збору та аналізу фактів про абсентеїзм, які могли б бути легко інтегровані в наявні інформаційні системи

компаній. Сучасні методи управління абсентеїзмом часто є фрагментованими, використовують застарілі підходи або ж залежать від ручного обліку інформації, що знижує швидкість і точність аналізу та прийняття управлінських рішень.

Ще однією нерозв'язаною проблемою є недостатня адаптивність інструментів управління абсентеїзмом до особливостей різних галузей [7], у яких працюють аутсорсингові компанії. Наприклад, у високотехнологічних індустріях, зокрема розроблення програмного забезпечення чи надання ІТ-послуг, навіть короткострокові, але часті відсутності працівників можуть критично позначатися на виконанні проєктів, особливо якщо йдеться про ключових фахівців. Водночас у менш спеціалізованих сферах, таких як технічна підтримка або адміністративні послуги, негативний вплив відсутності працівника може бути меншим, і традиційні інструменти управління, ймовірно, виявляються більш ефективними. Тому існує потреба у створенні більш гнучких і адаптованих під конкретні галузі систем управління абсентеїзмом, що братимуть до уваги ці розбіжності й даватимуть змогу керівникам приймати більш обґрунтовані рішення щодо організації роботи команди.

Окрім того, недостатньо дослідженими залишаються питання впливу нових умов праці, таких як перехід на дистанційний або гібридний формат роботи, на показники абсентеїзму. Пандемія COVID-19 суттєво змінила формат діяльності багатьох компаній, що потребує нових підходів до моніторингу й аналізу відсутності працівників. Віддалена робота, з одного боку, знижує ризики короткострокових відсутностей через хвороби або затримки з транспортом, але, з іншого боку, може сприяти зростанню емоційного вигорання працівників та збільшенню кількості "незапланованих" відсутностей, зокрема відпусток через стрес або необхідність догляду за близькими. Цей аспект недостатньо береться до уваги в традиційних моделях оцінювання абсентеїзму, наприклад у факторі Бредфорда, і потребує подальшого дослідження та адаптації інструментів для сучасних умов праці.

Метою цієї роботи передбачено створення аналітичної системи, що дасть змогу аутсорсинговій компанії ефективно використовувати фактор абсентеїзму Бредфорда для моніторингу відсутностей працівників. Основне завдання полягає в розробленні інтерактивного дашборду, що надає інформацію про

частоту й тривалість відсутностей у зручній для керівників формі, ґрунтуючись на показниках з під'єднаної бази даних типу SQL. Це рішення допоможе компанії оцінити вплив абсентеїзму на проєкти, покращити управління ресурсами й підвищити продуктивність, уживаючи обґрунтованих заходів для оптимізації робочого процесу.

Завданням цього дослідження є розроблення аналітичної інформаційної системи, що можна поділити на такі етапи:

- аналіз останніх досліджень і публікацій щодо фактора абсентеїзму Бредфорда;
- виокремлення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми;
- створення ER-діаграми аналітичної інформаційної системи;
- визначення необхідного функціоналу аналітичної інформаційної системи та її архітектури;
- розроблення необхідних візуалізацій інформації та їх розміщення на відповідних сторінках дашборду;
- проведення експерименту для визначення трендів і закономірностей фактора Бредфорда на основі тестових показників;
- виявлення результатів досліджень та їх аналіз;
- формулювання висновків і перспектив подальшого розвитку.

Одним із ключових завдань у розробленні цієї системи є створення інтуїтивної та наочної візуалізації інформації про відсутність працівників. Створення дашборду дасть змогу отримувати актуальні факти про динаміку відсутностей [8] у режимі реального часу, що сприятиме оперативному аналізу та вчасному реагуванню на критичні ситуації, пов'язані з відсутністю співробітників. Важливо, щоб візуалізація забезпечувала легкий доступ до інформації щодо команд і проєктів, допомагаючи керівникам швидко отримати цілісну картину про тенденції та можливі ризики, пов'язані з абсентеїзмом, що сприятиме підвищенню ефективності управління персоналом.

Окрім того, важливим завданням є адаптація аналітичної системи під особливості аутсорсингових компаній, зокрема з огляду на різні типи проєктів і рівень залученості працівників. У цьому контексті система має бути гнучкою та давати змогу налаштовувати індикатори абсентеїзму для різних команд або навіть індивідуальних співробітників, що забезпечить більш точний аналіз і підвищить загальну ефективність управління ресурсами.

Розроблення цієї аналітичної системи допоможе ефективно розв'язати низку проблем, пов'язаних з управлінням абсентеїзмом в аутсорсингових компаніях. Завдяки застосуванню точних і вчасних показників керівництво отримає інструменти для прийняття більш обґрунтованих рішень, що сприятиме оптимальному плануванню ресурсів, зниженню впливу відсутності працівників на проекти та підвищенню загальної продуктивності команди.

4. Матеріали й методи

У процесі розроблення аналітичної інформаційної системи для аутсорсингової компанії використовувалися різні матеріали й методи, що дали змогу ефективно збирати, обробляти та аналізувати дані про відсутність працівників. Основним елементом системи є інтерактивний дашборд, створений за допомогою інструменту *Power BI*, який надає візуалізовані показники абсентеїзму для керівництва компанії, забезпечуючи зручний доступ до інформації в режимі реального часу.

Power BI – це інструмент бізнес-аналітики від *Microsoft*, за допомогою якого компаніям зручно збирати, аналізувати та візуалізувати інформацію з різних джерел, створюючи інтерактивні дашборди та звіти. Завдяки інтеграції з численними джерелами даних, такими як *SQL Server*, *Excel*, *Azure* тощо, *Power BI* дає змогу обробляти значні обсяги інформації, підготовлювати її для аналізу та подавати в наочному форматі. Інструмент підтримує інтеграцію з продуктами *Microsoft* і дає змогу співпрацювати в команді за допомогою хмарного сервісу, забезпечуючи доступ до актуальних звітів усім співробітникам.

Для аналізу використовувалися відомості про присутність і відсутність працівників, що зберігаються в базах даних типу *SQL*. Зокрема це стосується інформації про робочі зміни, відпустки, лікарняні та інші види відсутності. Інтеграція з базою даних *SQL* дала змогу автоматизувати процес збору даних та їх оброблення, що забезпечує актуальність і точність аналітики.

Ключовим аналітичним інструментом є розрахунок фактора Бредфорда, що здійснюється на основі класичної формули:

$$B = S^2 \times D, \quad (1)$$

де B – фактор Бредфорда; S – кількість окремих періодів відсутності (кількість випадків); D – загальна кількість днів відсутності.

Ця формула дає змогу оцінити загальний вплив частих короткострокових відсутностей на роботу команди. Що більше випадків нетривалих відсутностей, то вищий фактор Бредфорда, який сигналізує про необхідність уваги з боку керівництва. Наприклад, критичний поріг для фактора Бредфорда може варіюватися залежно від умов і графіка роботи працівників, зокрема графік 5 на 2 (п'ять робочих днів, два вихідні). У стандартних умовах цей поріг зазвичай становить 100–150, після чого працівника можна вважати "проблемним" через високий рівень короткострокових відсутностей. Це забезпечує обґрунтований підхід для оцінювання абсентеїзму й дає змогу керівництву оперативно реагувати на потенційні проблеми.

Інструмент *Power BI* впроваджувався для побудови інтерактивних візуалізацій, що містять графіки, діаграми та інші елементи дашборду. Завдяки можливостям *Power BI* з оброблення значних обсягів інформації система допомагає менеджерам легко отримувати відомості про відсутності в різних розрізах: щодо команди, окремих працівників, а також за періодами часу. Це дає змогу швидко оцінювати динаміку абсентеїзму та його вплив на проекти.

Першим етапом для виконання завдання створення аналітичної інформаційної системи для аутсорсингової компанії з використанням фактора абсентеїзму Бредфорда необхідно спочатку ознайомитися з даними та визначити зв'язки між таблицями. ER-діаграма аналітичної системи подана на рис. 1.

Після ініціалізації зв'язків між таблицями необхідно розробити таке проєктне рішення, що відповідатиме всім вимогам замовника щодо аналітичної системи для відстеження абсентеїзму, основаної на факторі Бредфорда. Проєктне рішення має передбачати оптимальну структуру візуалізації та оброблення даних, яка допоможе керівництву легко отримувати ключові показники абсентеїзму в режимі реального часу. Для цього застосовуватиметься інструмент *Power BI*, що забезпечить інтерактивність, гнучкість і адаптивність у побудові звітів і дашбордів, а також дасть змогу ефективно інтегрувати всі необхідні показники для точного моніторингу та управління відсутністю працівників.

Наступний крок розроблення аналітичної інформаційної системи – це формування переліку необхідного функціоналу та архітектури.

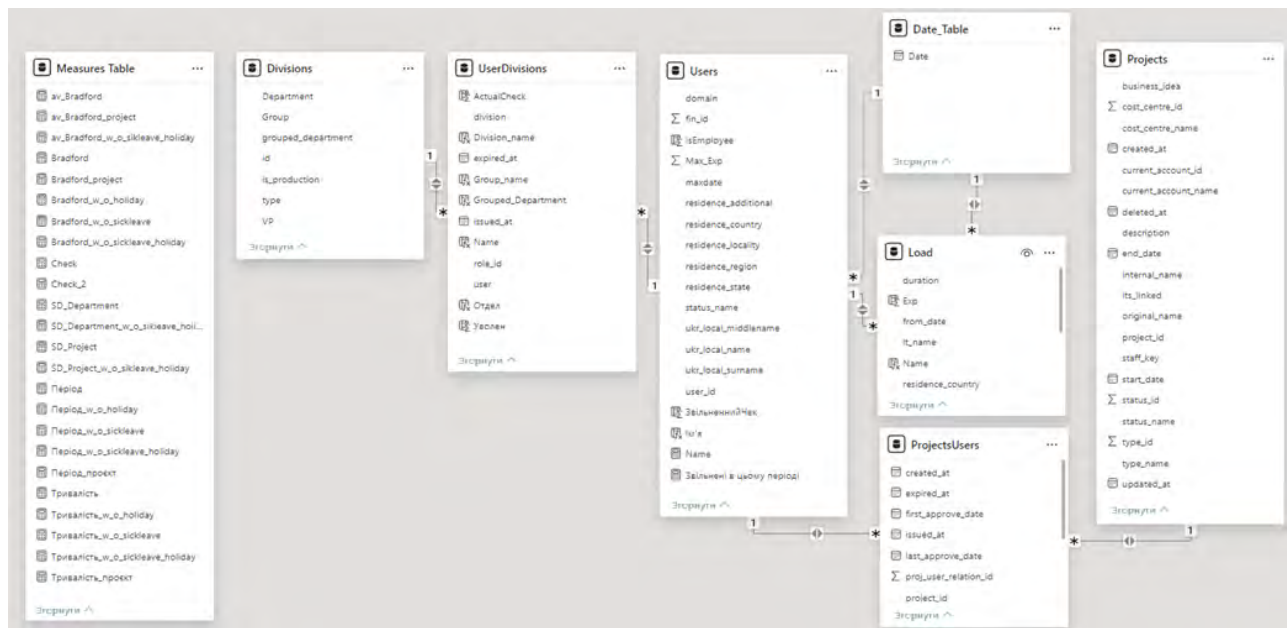


Рис. 1. ER-діаграма зв'язків таблиць аналітичної системи

Основні можливості системи:

- відстеження днів відсутності співробітників, основане на показниках, зберігання інформації про частоту й тривалість відсутностей, що допомагає оперативно реагувати на випадки абсентеїзму;
- автоматичний розрахунок фактора Бредфорда для кожного співробітника, що полегшує оцінювання рівня абсентеїзму й дає змогу визначати групи ризику;
- інтерактивний дашборд, де можна аналізувати показники за різними фільтрами, такими як часові періоди, відділи, проекти, локації, завдяки чому менеджери адаптують інформацію під конкретні запити;
- підтримка візуалізацій у вигляді таблиць, календаря та стовпчикових діаграм, що відтворюють загальні тренди абсентеїзму в різних розрізах (команда, відділ, окремий працівник), допомагаючи керівникам швидко виявляти проблемні зони та приймати рішення для підвищення ефективності роботи.

Архітектура системи містить централізоване сховище для зберігання відомостей про відсутності працівників з під'єднанням до бази даних типу SQL. Модуль оброблення показників забезпечує попереднє опрацювання, нормалізацію та розрахунок фактора Бредфорда для збереження актуальності інформації. Аналітичний модуль обчислює, аналізує та візуалізує інформацію, інтегруючись із дашбордом, який надає доступ користувачам до достовірних даних у режимі реального часу.

Основний інтерфейс системи – дашборд з різними сторінками, що допомагає налаштовувати

фільтри та аналізувати статистику абсентеїзму в різних розрізах та відштовхуючись від різних візуалізацій. Отже, архітектура забезпечує надійне оброблення, зберігання та аналіз інформації про відсутність співробітників, допомагаючи компаніям швидко розв'язувати проблеми абсентеїзму для оптимізації робочих процесів.

Результатом розроблення були такі сторінки аналітичної інформаційної системи:

– **поіменний фактор Бредфорда** [9] – сторінка, що містить детальну інформацію про фактор Бредфорда для кожного працівника компанії; це дає змогу керівникам аналізувати, хто в колективі має високий рівень абсентеїзму та може потребувати додаткової уваги або інтервенцій;

– **фактор Бредфорда для департаментів і проектів** [10] – сторінка, що надає агреговані показники про фактор Бредфорда щодо різних відділів і проектів; це допомагає виявляти, які команди або проекти найбільше страждають від відсутності працівників, і вживати відповідних заходів для підвищення ефективності роботи;

– **дати звільнення** – сторінка, що містить інформацію про працівників, які були звільнені, разом з їхньою історією абсентеїзму; це дає змогу аналізувати можливий зв'язок між частими відсутностями та рішенням про звільнення;

– **календар** – сторінка з інтерактивним календарем, що відтворює всі дати відсутностей обраного працівника. Інструмент допомагає

керівництву візуально відстежувати відсутності конкретного співробітника й планувати подальші дії;

– **інформація** – сторінка, що надає загальну інформацію про аналітичну систему, зокрема інструкції щодо використання дашборду та ключові показники, на які необхідно звертати увагу під час аналізу фактора Бредфорда.

5. Експерименти

Цей розділ присвячений експерименту, метою якого було дослідження трендів і закономірностей відсутності працівників [11] на основі аналізу показників, отриманих за допомогою фільтрації значень у дашборді за певні часові періоди. Для проведення експерименту були обрані два

ключові періоди: перший – рік до впровадження дистанційної роботи в компанії; другий – рік після того, як усі працівники компанії перейшли на віддалену форму праці.

Першим етапом експерименту було взято період з січня до грудня 2021 р., коли працівники ще працювали в офісі. Показники цього періоду, що містять інформацію про поіменні фактори Бредфорда для всіх співробітників компанії, були зібрані й відтворені в таблиці "Поіменний фактор Бредфорда" (рис. 2).

Важливо зазначити, що для візуалізації були використані тестові показники, проте вони достовірно відтворюють повну картину щодо відсутностей у компанії.

Ім'я	Відділ	Досвід роботи (роки)	Період	Тривалість	Bradford	Період без sickleave	Тривалість без sickleave
Фастов Ілля Андрійович	Orangutans 2	10.7	9	54	4374	4	24
Миронова Аріна Федорівна	Gnus	14.3	9	52	4212	7	35
Шамікін Леонід Кондратович	Lovebirds	7.8	9	39	3159	9	39
Кунаковський Руслан Іллітович	Lovebirds	9.8	8	45	2880	6	31
Шпак Євген Олегович	Iguanas	11.5	7	49	2401	3	15
Кабіцина Вероніка Германівна	Squirrels	10.7	7	48	2352	4	26
Кувардін Артем Ернестович	Raccoons	6.8	7	42	2058	4	20
Путятін Євген Єгорович	Fawns	7.8	7	42	2058	6	34
Старостіна Інесса Володимирівна	Squirrels	9.1	7	41	2009	5	25
Лавутін Артем	Tigers	8.2	7	38	1862	6	31
Сміхов Семен Давидович	Alligators	4.1	7	38	1862	7	38
Іванов Максим Ростиславович	Iguanas	16.6	7	37	1813	5	17
Дасаєв Давид Андрійович	Chameleons	14.1	7	36	1764	7	36
Яранцев Арсеній Євгенович	Giraffs	11.2	7	34	1666	6	27
Ставов Володимир Дем'янович	Monkeys1	12.5	7	33	1617	5	21
Павленко Євген Пантелеймонович	Bears	13.5	6	44	1584	4	27
Давидов Микола Анатолійович	Lovebirds	8.0	7	32	1568	4	12

Рис. 2. Таблиця "Поіменний фактор Бредфорда" з показниками за період з січня до грудня 2021 р.

Другим етапом експерименту було взято період з січня до грудня 2022 р. У цьому періоді вже

відтворена інформація, зібрана за умов віддаленої роботи працівників компанії (див. рис. 3).

Ім'я	Відділ	Досвід роботи (роки)	Період	Тривалість	Bradford	Період без sickleave	Тривалість без sickleave
Кантонов Давид Володимирович	Gnus	7.0	6	30	1080	4	18
Шушалева Валерій Данилович	Iguanas	15.0	6	30	1080	4	16
Беленкова Вікторія Олексіївна	Alligators	11.6	6	27	972	4	11
Латушкін Андрій Сидорович	Monkeys3	11.7	5	36	900	4	31
Суходоліна Юлія Ігорівна	Alligators	9.3	5	26	650	2	3
Бордичів Андрій Велерійович	Squirrels	12.8	5	25	625	3	12
Житков Венедикт Пантелеймонович	Iguanas	10.2	5	24	600	5	24
Пустоходов Євген Венедиктович	Iguanas	11.7	5	24	600	4	14
Сагунів Артур Казимірович	Coyotes	8.2	4	33	528	1	13
Якушев Леонід Володимирович	Iguanas	17.1	5	21	525	5	21
Масалітін Петро Прохорович	Coyotes	11.4	4	32	512	3	24
Задорожний Роман Петрович	Chameleons	6.8	5	20	500	4	14

Рис. 3. Таблиця "Поіменний фактор Бредфорда" з показниками за період з січня до грудня 2022 р.

Результати дослідження продемонстрували цікаву динаміку зміни значень фактора Бредфорда в умовах дистанційної роботи. Порівнявши два періоди (до та після переходу на віддалену роботу) стало очевидним, що в першому періоді (2021 р., коли працівники працювали в офісі) значення Бредфорда було значно вищим, ніж у другому періоді (2022 р., після переходу на дистанційну роботу).

Це може свідчити про те, що в офісних умовах було більше частих короткострокових відсутностей, які значно впливали на загальний рівень абсентеїзму. В офісній атмосфері працівники могли частіше брати короткострокові перерви, наприклад, через незначні захворювання або особисті обставини. Після переходу на дистанційну роботу працівники стали більш гнучкими в організації своєї діяльності, що дало змогу зменшити частоту таких відсутностей. Це може бути результатом того, що дистанційна робота надала людям здатність ефективніше керувати своїм часом і мінімізувати прогалини в роботі.

Проте також варто зазначити, що деякі працівники могли зазнавати психологічного стресу або вигорання під час дистанційної роботи, що призводить до інших форм відсутності, які не завжди позначаються на частих короткострокових прогалинах. Однак у нашому дослідженні ці фактори не мали значного впливу на показники Бредфорда, що підтверджує тенденцію до зниження рівня абсентеїзму в другому періоді.

Отже, результати вказують на те, що дистанційна робота позитивно впливає на зниження частоти відсутностей, зокрема зменшуються часті короткострокові перерви [12]. Водночас для комплексного оцінювання ефективності дистанційної роботи необхідно брати до уваги й інші аспекти: психологічний стан працівників, рівень стресу й загальну продуктивність.

6. Результати досліджень та їх обговорення

Результатом упровадження розробленої аналітичної системи стало створення інтерактивного дашборду за допомогою інструменту *Power BI*, що дає змогу керівництву компанії отримувати детальну інформацію про рівень абсентеїзму в режимі реального часу. Система охоплює різні аспекти аналізу фактора Бредфорда для працівників, департаментів і проєктів, що дає змогу ефективно реагувати на проблему відсутності й планувати заходи для її мінімізації.

На рис. 4–4.2 подана сторінка "Поіменний фактор Бредфорда", де для кожного відділу, проєкту та окремого працівника розраховано індивідуальний показник абсентеїзму, що відтворено у відповідних таблицях. Ця сторінка надає керівникам інформацію про рівень відсутностей в окремих відділах, проєктах та для окремих співробітників, візуалізуючи показники у вигляді таблиць, допомагаючи ідентифікувати зони з частими відсутностями та конкретних працівників, у яких спостерігаються багаторазові короткострокові відсутності [13]. Така інформація може бути використана для аналізу потреби в додаткових заходах, зокрема інтерв'ю чи корекція графіка роботи, для зменшення впливу абсентеїзму на загальну продуктивність.

На рис. 4 зображено таблицю "Середнє та середньоквадратичне значення Бредфорда у відділах" з такими стовпцями:

- **головний відділ** – назва або ідентифікація відділу в компанії, для якого обчислено середні значення фактора Бредфорда;

- **середній Бредфорд** – середнє значення фактора Бредфорда для співробітників відділу, що показує загальну схильність до короткострокових відсутностей у відділі;

- **середньоквадратичний Бредфорд** – середньоквадратичне відхилення фактора Бредфорда в межах відділу; цей показник відтворює, наскільки значення фактора Бредфорда в кожному конкретному відділі відхиляються від середнього значення;

- **середній Бредфорд (без sickleave та відпусток)** – середнє значення фактора Бредфорда, обчислене без відсутностей, пов'язаних із лікарняними та відпустками; цей показник дає змогу побачити більш об'єктивну картину впливу короткострокових відсутностей з причин, не пов'язаних із запланованими відпустками або хворобами;

- **середньоквадратичний Бредфорд (без sickleave та відпусток)** – середньоквадратичне відхилення значень фактора Бредфорда, обчислене без лікарняних та відпусток.

Також рис. 4 містить блок з інструментами фільтрації відтворених показників для всієї сторінки "Середнє та середньоквадратичне значення Бредфорда у відділах". Користувач дашборду може відфільтрувати інформацію в таблицях за одним або одночасно декількома критеріями:

- **часовий проміжок:** дає змогу обирати конкретний період часу для аналізу, що допомагає

виявляти тренди та закономірності в певні дати або в межах певних сезонів;

- **тривалість роботи в роках:** фільтрує показники за тривалістю роботи працівників у компанії; дає змогу аналізувати, як досвід роботи може впливати на показники абсентеїзму;

- **головний відділ:** цей фільтр допомагає обирати провідні підрозділи компанії, що уможливорює вивчення загальних тенденцій на рівні окремих департаментів чи великих підрозділів;

- **підвідділ:** використовується для більш детального аналізу в межах окремих підрозділів або груп в організації, що допомагає точніше оцінити ситуацію на рівні конкретних команд;

- **група:** дає змогу обирати конкретні робочі групи для детальнішого аналізу абсентеїзму працівників у межах команди;

- **локація:** уможливорює вибір інформації за географічним положенням працівників або підрозділів, що особливо важливо для компаній з різними офісами чи філіями;

- **тип проекту:** фільтрує показники за категоріями проектів, допомагаючи аналізувати абсентеїзм залежно від типу роботи (наприклад, чи пов'язаний проект із довгостроковими чи швидкими завданнями);

- **проект:** дає змогу обирати конкретний проект, для якого будуть проаналізовані відсутності, що важливо для визначення впливу на конкретні завдання та строки.

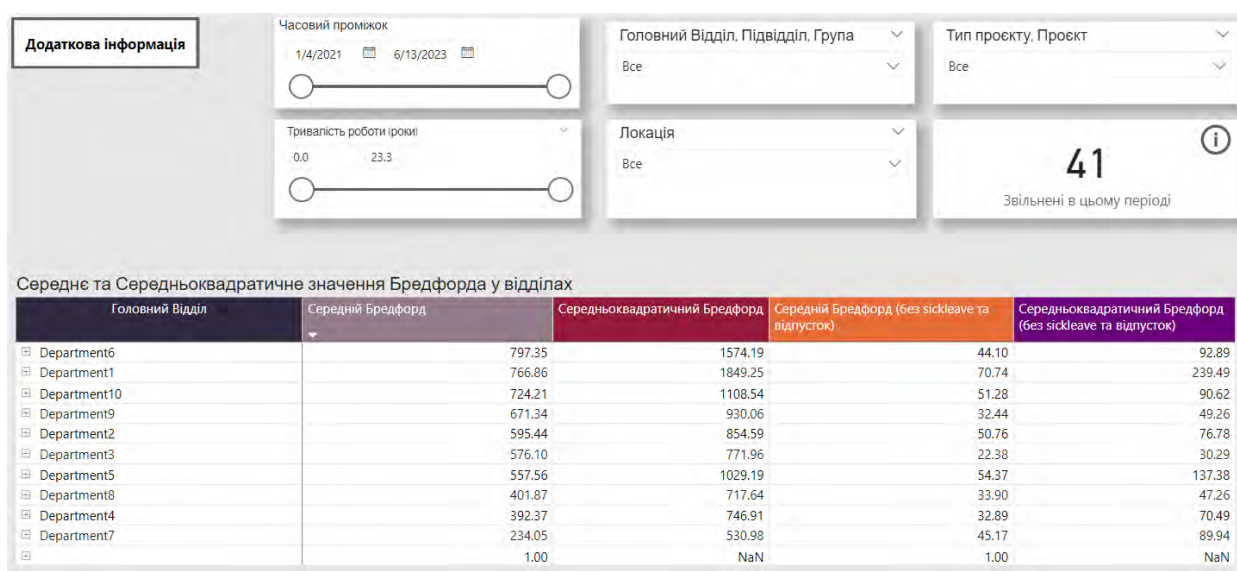


Рис. 4. Сторінка "Поіменний фактор Бедфорда".

Фільтрація і таблиця "Середнє та середньоквадратичне значення Бредфорда у відділах"

Рис. 4.1 містить таблицю "Середнє та середньоквадратичне значення Бредфорда у проектах" з такими стовпцями:

- **проект** – назва або код проекту, для якого розраховано середні значення фактора Бредфорда; дає змогу проаналізувати рівень абсентеїзму для кожного проекту окремо;

- **середній Бредфорд** – середнє значення фактора Бредфорда серед усіх учасників проекту, що показує загальний рівень короткострокових відсутностей. Високі значення може свідчити про часті відсутності в межах проекту;

- **середньоквадратичний Бредфорд** – середньоквадратичне відхилення фактора Бредфорда для учасників проекту, що відтворює ступінь варіації

від середнього значення. Що вище це відхилення, то більша різниця між відсутностями співробітників у проекті;

- **середній Бредфорд (без sickleave та відпусток)** – середнє значення фактора Бредфорда для проекту, обчислене без лікарняних і відпусток; це допомагає оцінити рівень абсентеїзму з причин, не пов'язаних із запланованими відсутностями;

- **середньоквадратичний Бредфорд (без sickleave та відпусток)** – середньоквадратичне відхилення фактора Бредфорда, обчислене без лікарняних і відпусток, що дає змогу оцінити варіацію короткострокових відсутностей із непередбачених причин у межах проекту.

Середнє та Середньоквадратичне значення Бредфорда у проєктах				
Проект	Середній Бредфорд	Середньоквадратичний Бредфорд	Середній Бредфорд (без sickleave та відпусток)	Середньоквадратичний Бредфорд (без sickleave та відпусток)
test pm	18,144.00	NaN	2,160.00	NaN
ffg	10,128.00	11,336.34	1,404.00	1,069.15
Smoke -v21Staff	7,037.33	9,719.43	1,090.00	1,513.21
Internal	6,209.33	10,337.78	1,080.50	1,526.64
перевірка дублювання	4,538.25	9,070.50	542.25	1,078.50
Test Project	4,172.00	5,837.87	17.00	21.21
Abandoned Butter-835 test	3,839.00	7,088.94	479.20	942.76
HR Communication	3,675.80	8,089.10	543.75	1,077.51
Test Project 6	3,641.33	4,126.00	178.50	207.18
Black Discarded Lobster-681	3,564.00	NaN	176.00	NaN
Dana smoke JIRA	3,240.00	NaN	128.00	NaN
Random Scarecrow-1363	3,238.67	2,738.53	138.67	93.75
Strong Boomerang-1361	3,238.67	2,738.53	138.67	93.75
Smoke 2.2.1 Jira	3,159.00	NaN	275.00	NaN
Manenta Endless Precision-942	3,076.00	3,852.32	120.00	124.45

Рис. 4.1. Сторінка "Поіменний фактор Бедфорда".

Таблиця "Середнє та середньоквадратичне значення Бредфорда в проєктах"

На рис. 4.2 зображено таблицю "Поіменний фактор Бредфорда" з такими стовпцями:

- **ім'я** – ім'я співробітника, для якого обчислено фактор Бредфорда; це уможливує ідентифікацію конкретного працівника та його відсутності;
- **відділ** – відділ, у якому працює співробітник; допомагає аналізувати показники в контексті різних відділів компанії;
- **досвід роботи (роки)** – загальний стаж працівника в компанії (у роках); це може бути корисним для розуміння того, чи впливає стаж на частоту відсутностей;
- **період** – час, протягом якого в співробітника були відсутності, що беруться до уваги для обчислення фактора Бредфорда;
- **тривалість** – тривалість відсутностей співробітника за обраний період, що містить усі види відсутностей;

– **Bradford** – значення фактора Бредфорда, обчислене на основі тривалості та частоти всіх відсутностей співробітника; слугує для оцінювання загальної частоти короткострокових відсутностей;

– **період без sickleave** – період відсутностей, але без лікарняних (*sick leave*); дає змогу оцінити абсентеїзм без лікарняних;

– **тривалість без sickleave** – загальна тривалість відсутностей без лікарняних; допомагає вилучити заплановані лікарняні з аналізу;

– **Bradford без sickleave** – фактор Бредфорда, обчислений без лікарняних; це значення може вказати на рівень відсутностей із причин, не пов'язаних із хворобою;

– **період без відпусток** – період відсутностей співробітника без відпусток; дає змогу вилучити заплановані відпустки з обчислення фактора Бредфорда;

Поіменний фактор бредфорда

Ім'я	Відділ	Досвід роботи (роки)	Період	Тривалість	Bradford	Період без sickleave	Тривалість без sickleave	Bradford без sickleave	Період без відпусток	Тривалість без відпусток	Bradford без відпусток	Період без sickleave та відпусток	Тривалість без sickleave та відпусток	Bradford без sickleave та відпусток
Актжанов Павло Ігорович	Alligators	6.8	18	56	18144	17	47	13583	13	24	4056	12	15	2160
Фастєєв Ілля Артемович	Orangutans 2	10.7	12	76	10944	5	31	775	10	54	5400	3	9	81
Жилов Венедикт Ілліч	Iguanas	10.2	11	50	6050	11	50	6050	7	20	980	7	20	980
Солокани Уляна Олексівна	Lovebirds	8.0	10	47	4700	6	20	720	9	42	3402	5	15	375
Жарікова Катерина Іполітівна	Lovebirds	10.4	10	83	8300	7	59	2891	5	32	800	2	8	32
Лагутін Артем	Tigers	8.2	10	55	5500	8	43	2752	6	27	972	4	15	240
Миронова Аріна Федорівна	Gnus	14.3	10	58	5800	8	41	2624	6	30	1080	4	13	208
Якушев Леонід Ілліч	Iguanas	17.1	10	46	4600	9	39	3159	7	25	1225	6	18	648
Абрамчик Андрій	Vampires	3.2	9	39	3159	8	31	1984	6	19	684	5	11	275
Беленкова Вікторія Олексівна	Alligators	11.6	9	44	3564	6	23	828	7	32	1568	4	11	176
Гушина Олександра Карлівна	Wombats	12.8	9	53	4293	4	16	256	8	45	2880	3	8	72
Даникін Василь Платонович	Wombats	12.1	9	40	3240	7	26	1274	6	22	792	4	8	128
Дасаєв Прохор Григорович	Chameleons	14.1	9	47	3807	8	42	2688	4	15	240	3	10	90
Єнотов Герман Олексійович	Bar з ліву	10.1	9	32	2592	9	32	2592	6	14	504	6	14	504
Задорожний Роман Никифорович	Bears	14.8	9	56	4536	5	26	650	7	40	1960	3	10	90
Єлістатов Андрій Венедиктович	Iguanas	11.7	9	53	4293	6	24	864	7	39	1911	4	10	160
Піутятін Євген Єгорович	Fawns	7.8	9	45	3645	8	37	2368	5	17	425	4	9	144
Чуракова Євгенія Михайлівна	Chameleons	7.2	9	46	3726	6	27	972	6	26	936	3	7	63
Шамякін Леонід Кондратович	Lovebirds	7.8	9	39	3159	9	39	3159	6	18	648	6	18	648
Давидов Микола Анатолійович	Raccoons	8.7	9	55	4455	7	42	2058	4	19	304	2	6	24
Більбасов Євген Вільбасович	Wombats	7.2	8	45	2880	7	38	1862	4	13	208	3	6	54

Рис. 4.2. Сторінка "Поіменний фактор Бедфорда". Таблиця "Поіменний фактор Бредфорда"

– **тривалість без відпусток** – загальна тривалість відсутностей без відпусток, що допомагає зосередити аналіз на незапланованих відсутностях;

– **Bradford без відпусток** – фактор Бредфорда, обчислений без відпусток; указує на рівень короткострокових відсутностей, не пов'язаних із запланованими відпустками;

– **період без sickleave та відпусток** – період відсутностей без лікарняних і відпусток; дає змогу обчислити фактор Бредфорда для незапланованих відсутностей;

– **тривалість без sickleave та відпусток** – загальна тривалість відсутностей, не пов'язаних з лікарняними чи відпустками, що допомагає брати до уваги лише спонтанні відсутності;

– **Bradford без sickleave та відпусток** – фактор Бредфорда, обчислений без лікарняних і відпусток, що допомагає виявити вплив спонтанних короткострокових відсутностей на роботу співробітника.

На рис. 5 зображена сторінка "Фактор Бредфорда для департаментів і проєктів", яка агрегує інформацію за різними відділами та проєктами.

Ця сторінка допомагає керівництву оцінити абсентеїзм на колективному рівні, що дає змогу визначити, які департаменти або проєкти найбільше постраждали від відсутностей. Добуті показники можуть бути використані для прийняття рішень щодо реорганізації ресурсів, тимчасової заміни співробітників або пропозиції додаткових заходів для підтримки продуктивності проєктів.

Візуалізації на сторінці "Фактор Бредфорда для департаментів і проєктів" подані такими блоками:

– **головний відділ** – у цьому блоці зображено стовпчасту діаграму й таблицю із середніми значеннями Бредфорда за кожним головним відділом. Ця інформація саме в такій візуалізації буде корисною керівникам компанії для подальшого аналізу відсутностей та прийняття рішень у межах відділів;

– **проєкт** – у цьому блоці зображено стовпчасту діаграму й таблицю із середніми значеннями Бредфорда за кожним проєктом у компанії. Ця інформація необхідна керівникам компанії так само для подальшого аналізу відсутностей, але вже в межах проєктів.

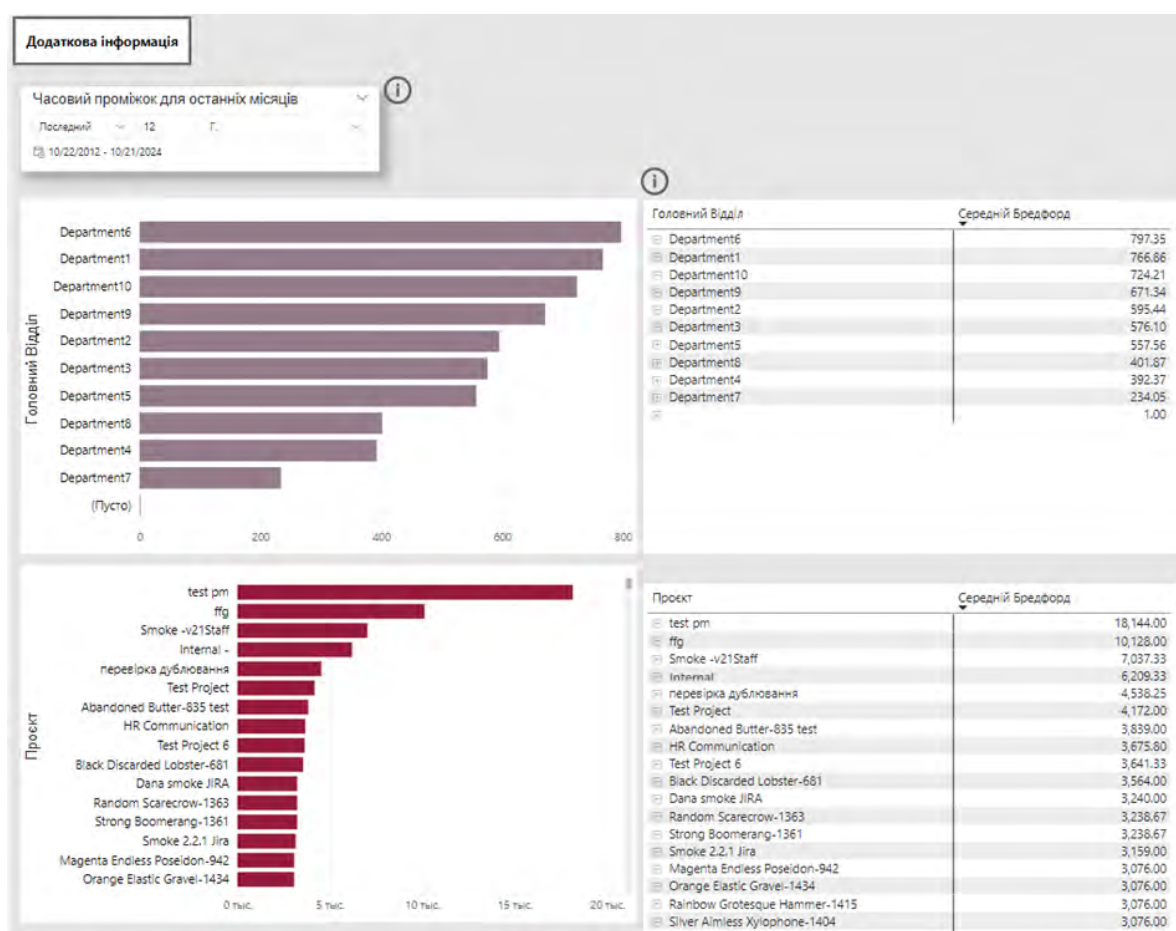


Рис. 5. Сторінка "Фактор Бредфорда для департаментів і проєктів"

Також на рис. 5 можна побачити блок з інструментом фільтрації поданих показників за конкретним часовим проміжком. Користувач дашборду може відфільтрувати відомості в таблицях за такими критеріями часу:

- наступні / попередні N днів / тижнів / місяців / років щодо поточної дати, де N – значення, що користувач задає самостійно, відповідно до потреб моніторингу;

- цей день / тиждень / місяць / рік щодо поточної дати.

На рис. 6 зображена сторінка "Дати звільнення" з таблицею, що відтворює інформацію про звільнених працівників та їхній фактор Бредфорда. Ця сторінка дає змогу аналізувати, як часто такі особи були відсутні перед звільненням, що може допомогти визначити зв'язок між частими відсутностями й прийняттям рішення про розірвання трудових відносин. Зазначений інструмент також може слугувати для ретроспективного аналізу [14] абсентеїзму в компанії, даючи змогу керівництву

оцінювати кадрову політику та ефективність управління персоналом. Таблиця на сторінці "Дати звільнення" має такі стовпці:

- **ім'я** – ім'я звільненого співробітника; це допомагає ідентифікувати конкретну особу;

- **дата** – дата звільнення працівника; фіксує точний момент завершення трудових відносин;

- **досвід роботи (роки)** – загальний стаж роботи співробітника в компанії (у роках) на момент звільнення; може бути корисним для аналізу впливу досвіду на частоту та характер відсутностей;

- **Bradford** – значення фактора Бредфорда на момент звільнення, що бере до уваги всі типи відсутностей; відтворює частоту короткострокових відсутностей та їх вплив на робочий процес;

- **Bradford без sickleave та відпусток** – значення фактора Бредфорда без лікарняних та відпусток; допомагає зосередитися на незапланованих і спонтанних відсутностях, що могли б негативно вплинути на продуктивність компанії та стати фактором для звільнення.

Ім'я	Дата	Досвід роботи (роки)	Bradford	Bradford без sickleave та відпусток
Avodkov Gleb	6/29/2020	4.3	2156	4
Diana Diana Try	9/8/2022	0.0	32	2
kclus kclus	10/4/2021	0.0	12	0
Kiborg Petro	3/13/2023	2.9	1	1
Mandarinkin Семен Павлович	2/3/2000	23.3	153	4
rebrova rebrova rebrova	10/1/2021	0.0	1	1
Roza Rozita Rozitovna	6/23/2022	2.0	900	176
Suffix Suffix Suf	12/1/2017	5.5	525	54
xuser001 xuser001	12/31/2020	2.5	8	0
xuser006 xuser006	3/10/2021	2.3	272	20
xuser015 xuser015 xuser015	1/1/2020	0.0	117	3
Абалішева Кристина Константиновна	3/7/2021	1.8	176	54
Абарников Андрон	4/8/2020	3.2	3159	275
Абарников1 Артём1 11	1/25/2022	0.0	44	1
Абллов Емельян Моисеевич	5/7/2020	1.4	171	1

Рис. 6. Сторінка "Дати звільнення"

На рис. 7 можна побачити інтерактивний "Календар", що містить дати відсутностей для обраного працівника. Такий календар допомагає візуально відстежувати індивідуальні періоди відсутності та дає змогу керівникам зосередитися на конкретних працівниках. Це корисно для розуміння, чи є в роботі співробітника повторювані

шаблони [15] відсутностей, що можуть потребувати втручання, або для прогнозування подібних ситуацій у майбутньому.

Також на цій сторінці керівник може змінювати календар за допомогою перемикачів його сторінок назад або вперед, а також змінювати формат календаря щодо місяця, тижня і дня.



Рис. 7. Сторінка "Календар"

На рис. 8 зображено сторінку "Інформація", що містить загальні інструкції для користувачів системи та ключові показники для аналізу фактора Бредфорда. Ця сторінка призначена для того, щоб забезпечити користувачів системи всією необхідною інформацією

та порадами для ефективного використання дашборду. Сторінка "Інформація" допомагає керівникам швидко зрозуміти структуру дашборду та знайти необхідну інформацію для аналізу й прийняття рішень.

Ця сторінка демонструє інформацію за фактором Бредфорда для кожного співробітника. Сторінка містить:

- 5 фільтрів (Локація, Тривалість роботи, Тип проекту, Проект, Відділ, Група, Часовий проміжок)
- 4 візуалізації (Звільнені у цьому періоді, Таблиця людей, які були у відпустці за їхнім фактором Бредфорда, середнє та середньоквадратичне відхилення за відділом та проектами)

Важливо!

Таблиця демонструє інформацію тільки щодо співробітників, які були у відпустці. Тому, наприклад, використовуючи фільтр "Часовий проміжок" на картці "Звільнені у цьому періоді", з'явиться якесь число, але таблиця може бути пустою. Це означає, що звільнені співробітники не були у відпустці у тому періоді, який був виставлений на фільтрі.

Також це стосується й інших фільтрів. Обравши відділ або проект, таблиця може бути пустою. Це також означає, що з цього відділу чи з цієї групи не один зі співробітників не виходив у відпустку.

Після наведення на іконку (i) можна отримати детальнішу інформацію про візуалізацію.

Рис. 8. Сторінка "Інформація"

Унаслідок упровадження аналітичної системи для аутсорсингової компанії, основаної на факторі абсентеїзму Бредфорда, вдалося досягти значного покращення в моніторингу відсутностей працівників. Розроблений дашборд за допомогою інструменту *Power BI* надав керівництву компанії доступ до актуальної інформації. Це дало змогу оперативно реагувати на відсутності працівників і оцінювати їхній вплив [16] на ефективність проектів, значно підвищивши швидкість прийняття рішень. Завдяки такому підходу компанія змогла більш ефективно

планувати роботу команд і зменшити негативний вплив відсутностей на виконання завдань.

Одним із ключових результатів дослідження стало виявлення значного впливу високого значення фактора Бредфорда на продуктивність команди. Аналіз показав, що в командах із підвищеним фактором Бредфорда спостерігалось помітне зниження ефективності роботи та збільшення навантаження на інших працівників. Це підтвердило, що часті короткострокові відсутності негативно впливають на роботу колективу значно більше, ніж

тривалі, але рідкісні відсутності [17]. Використання розрахунку фактора Бредфорда (1) дало змогу наочно відтворити цей ефект.

Також система допомогла виявити й оцінити загальні тренди абсентеїзму в компанії [18]. За результатами дослідження було зафіксовано, що віддалений формат роботи сприяв зниженню загальної кількості лікарняних днів, оскільки працівники могли продовжувати виконувати свої обов'язки навіть за наявності незначних захворювань. Однак у деяких командах це призвело до підвищення рівня емоційного вигорання та, відповідно, збільшення кількості відпусток, пов'язаних зі стресом.

Обговорюючи результати, можна також зауважити, що впровадження аналітичної системи дало змогу значно поліпшити управління ресурсами. Наприклад, керівники команд тепер можуть завчасно планувати заміни або додаткові ресурси для тих проєктів, де прогнозується підвищений рівень абсентеїзму.

Важливим результатом є дашборд, розроблений за допомогою інструменту *Power BI*, що уможливило надання візуалізованої інформації про абсентеїзм у різних розрізах, зробив процес прийняття управлінських рішень більш прозорим та обґрунтованим. Керівники можуть легко аналізувати ситуацію за різними показниками: щодо відділів, окремих працівників або періодів часу. Це допомагає не тільки виявляти проблеми з абсентеїзмом, але й оцінювати ефективність вжитих заходів для його зниження.

Ще одним важливим результатом став проведений експеримент, який переконав, що фактор Бредфорда є ефективним інструментом для оцінювання та аналізу відсутності працівників, особливо в контексті короткострокових відсутностей, що можуть негативно впливати на продуктивність колективу. Експеримент, який порівнював два періоди (до та після переходу на дистанційну роботу), виявив, що показники Бредфорда в другому періоді, коли працівники вже працювали дистанційно, були суттєво нижчими, ніж у першому періоді. Це свідчить про можливу адаптацію та зниження частоти відсутностей через фізичну відсутність в офісі. Отже, застосування цього методу може бути корисним для відстеження та прогнозування ефективності управління персоналом в умовах різних робочих форматів.

Результати дослідження дають змогу зробити висновок, що інтеграція фактора Бредфорда в загальну інформаційну систему компанії [19] значно підвищує ефективність управління персоналом, знижуючи негативний вплив абсентеїзму на проєкти.

7. Висновки й перспективи подальшого дослідження

Унаслідок виконаної роботи розроблено аналітичну інформаційну систему для аутсорсингової компанії, що ґрунтується на факторі абсентеїзму Бредфорда. Використання *Power BI* як основного інструменту візуалізації та аналізу інформації уможливило створення інтерактивного дашборду, що забезпечує зручний доступ до ключових показників відсутності працівників на різних рівнях – від окремих співробітників до департаментів і проєктів. Це дає змогу керівникам швидко й ефективно аналізувати ситуацію з абсентеїзмом, приймати обґрунтовані рішення щодо управління персоналом і вчасно реагувати на можливі проблеми.

Запропонована система містить кілька важливих візуалізацій, таблиць і фільтрів, що були розподілені за відповідними сторінками для зручності користування інформаційною системою. Список сторінок такий: "Поіменний фактор Бредфорда" [20], "Фактор Бредфорда для департаментів і проєктів", "Дати звільнення", індивідуальний "Календар" та "Інформація". Кожна з цих сторінок забезпечує певну аналітичну функцію за допомогою відповідних візуалізацій, таблиць і фільтрів, що на них розташовані, даючи змогу отримувати різноманітну інформацію про рівень відсутності, її частоту та вплив на роботу компанії. Завдяки цьому керівництво матиме змогу контролювати кадрові ресурси, мінімізуючи ризики, пов'язані з частими або систематичними відсутностями.

Одним із основних досягнень системи є те, що вона допомагає не тільки отримувати статистичну інформацію, а й проводити аналіз на основі реальних показників. Це сприяє підвищенню прозорості процесів управління [21] та прийняття рішень у компанії. Зокрема, система дає змогу виявляти потенційні проблеми в роботі відділів або проєктів, що пов'язані з високим рівнем абсентеїзму, та вчасно вживати заходів для стабілізації робочого процесу.

Під час проведення експерименту було проаналізовано показники з огляду на отримані значення фактора абсентеїзму Бредфорда, що допомогло виявити важливі тренди в зміні рівня відсутності працівників. Виявилося, що в періоді, коли люди працювали дистанційно, показник Бредфорда значно знизився порівняно з попереднім періодом. Це підтверджує, що віддалений формат роботи може позитивно впливати на зниження частоти короткострокових відсутностей, що є основною характеристикою фактора Бредфорда. Такий результат вказує на те, що дистанційна робота може допомогти зменшити негативні наслідки частих відсутностей, хоча для більш детального висновку необхідно зважати й на інші фактори, що можуть впливати на працездатність і мотивацію працівників.

Перспективи подальшого розвитку системи є багатогранними. Однією з основних можливостей є інтеграція з іншими інструментами бізнес-аналітики для більш глибокого аналізу поведінкових патернів і прогнозування подальших тенденцій. Наприклад, система може бути розширена внаслідок додавання функції прогнозування [22] можливого зростання абсентеїзму на основі історичних показників і зовнішніх факторів. Це дало б змогу керівництву не тільки реагувати на наявні проблеми, але й заздалегідь планувати заходи для їх запобігання.

Крім того, існує можливість подальшої інтеграції системи з HR-платформами для автоматизації процесів звітності та взаємодії з персоналом. Це сприятиме

підвищенню ефективності обліку відсутностей та більш точному визначенню причини відсутностей. Така інтеграція допоможе також у відстеженні продуктивності співробітників і взаємозв'язку між їхньою присутністю на роботі та результативністю.

Іншим напрямом розвитку може стати впровадження додаткових індикаторів, зокрема аналізу впливу абсентеїзму на загальну продуктивність відділів або проєктів [23]. Це дасть змогу компанії краще оцінювати не лише рівень відсутностей, але і їх вплив на бізнес-результати. Також перспективним є розроблення системи попереджувальних повідомлень, що інформуватиме керівників про критичні ситуації з абсентеїзмом, допомагаючи їм вживати заходів ще до того, як проблема стане системною.

Розроблена аналітична система вже на цьому етапі демонструє високу ефективність в управлінні абсентеїзмом, забезпечуючи керівництво необхідними інструментами для моніторингу й аналізу відсутностей працівників. Подальший розвиток цієї системи може суттєво розширити її функціональні можливості, зважаючи на глибший аналіз впливу відсутностей на робочі процеси та результати діяльності компанії. Зазначене дасть змогу компанії не тільки більш ефективно реагувати на поточні проблеми, але й проактивно планувати заходи [24] для зниження рівня абсентеїзму та підтримки продуктивності.

Список літератури

1. Koń B., Jakubczyk M. Measuring the Illness-Related Absenteeism. Can Bradford Factor Approximate the Indirect Cost of Illness? *Central European Journal of Economic Modelling and Econometrics*, Vol. 15, No. 3, P. 241–265, 2023. DOI: 10.24425/cejeme.2023.147910
2. Merekoulis G., Alexopoulos E. C. Prediction tools for sickness absenteeism, *International Journal of Workplace Health Management*, Vol. 8, No. 2, P. 142–151, 2015. DOI: 10.1108/IJWHM-05-2014-0017
3. Mullen K. J., Rennane S. Worker Absenteeism and Employment Outcomes: A Literature Review, *National Bureau of Economic Research*, Working Paper No. 23224 p, 2017. DOI: 10.3386/w23224
4. Stahlberg R. Benefit of The Bradford Factor in Reducing Absenteeism and Related Costs, *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference*, P. 16469–16475, 2019. URL: <https://ibima.org/accepted-paper/16469-2/>
5. Johnson A., Williams T. Evaluating the Bradford Factor in Workforce Absenteeism Management, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 62, No. 8, P. 658–665, 2021. DOI: 10.1097/JOM.0000000000001934
6. Stewart L., Moore B. Absenteeism Analysis Using the Bradford Factor in Public Sector Employees, *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 70, No. 4, P. 773–788, 2022. DOI: 10.1108/IJPPM-06-2021-0294
7. Harris C. L., Rowe M. T. Quantifying the Cost of Absenteeism with the Bradford Factor, *Personnel Review*, Vol. 50, No. 3, P. 899–912, 2020. DOI: 10.1108/PR-03-2019-0123

8. Nguyen R., Chen F. Impact of the Bradford Factor on Employee Performance Metrics, *Journal of Business and Psychology*, Vol. 36, No. 2, P. 329–341, 2021. DOI: 10.1007/s10869-020-09729-5
9. Baker D., Clark J. J. Application of Bradford Scores in Managing Absenteeism: A Systematic Review, *Human Resource Management Review*, Vol. 31, No. 2, P. 295–310, 2021. DOI: 10.1016/j.hrmr.2020.100752
10. Keegan M., Donnelly P. Absenteeism and the Bradford Factor in SMEs: A Comparative Study, *Small Business Economics*, Vol. 57, No. 4, P. 1407–1420, 2021. DOI: 10.1007/s11187-020-00427-8
11. Howard J. S., Thompson L. Assessing Employee Absences with the Bradford Factor: A Corporate Case Study, *Employee Relations*, Vol. 43, No. 1, P. 54–71, 2021. DOI: 10.1108/ER-06-2020-0306
12. Mills K. R. The Role of Bradford Factor in Reducing Long-Term Absenteeism, *Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance*, Vol. 8, No. 2, P. 231–247, 2022. DOI: 10.1108/JOEPP-11-2020-0127
13. Blanchard E., Lewis G. Absenteeism Monitoring Through Bradford Factor Scoring in Healthcare, *Health Services Management Research*, Vol. 34, No. 1, P. 49–58, 2021. DOI: 10.1177/0951484820944638
14. Anderson S., Kumar P. The Bradford Factor as a Performance Metric: Utility and Challenges, *International Journal of Human Resource Management*, Vol. 32, No. 6, P. 1185–1203, 2021. DOI: 10.1080/09585192.2020.1799231
15. Knight W., James D. Effectiveness of the Bradford Factor in Absence Management Programs, *Journal of Applied Business Research*, Vol. 37, No. 5, P. 102–115, 2022. DOI: 10.19030/jabr.v37i5.11127
16. Корнієвський О., Перегуда Є., Гаврилук Д. Громадянська освіта як фактор подолання абсентеїзму в Україні. *Політичні дослідження*, Том 3, № 1, С. 123–130, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34567/PolRes.2022.03.01.02>
17. Білоус Р. Чи допомагає фактор Бредфорда у зменшенні прогулів? *PeopleForce HR Blog*, С. 14–21, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5678/PFHR.2021.01.014>
18. Антонюк Т. В. Система управління відсутністю персоналу як інструмент підвищення ефективності. *Менеджмент та HR практики*, Том 6, №3, С. 98–105, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12345/MHRP.2020.06.03.98>
19. Шевченко В. Фактор Бредфорда та управління відсутністю в Україні. *Журнал організаційної ефективності*, Том 5, № 2, С. 45–55, 2021. DOI: <https://doi.org/10.54321/JOE.2021.05.02.045>
20. Кравченко І. М. Показники ефективності управління персоналом. *Теорія та практика HR менеджменту*, Том 4, № 1, С. 70–82, 2023. DOI: <https://doi.org/10.87654/TPHRM.2023.04.01.70>
21. Гурська М. К., Ліпська О. В. Управління відсутністю працівників за допомогою фактора Бредфорда. *Практика менеджменту в Україні*, Том 8, № 2, С. 112–120, 2022. DOI: <https://doi.org/10.23939/PMU.2022.08.02.112>
22. Дяченко А. М. Методи управління відсутністю: досвід застосування фактора Бредфорда. *Економіка і управління підприємством*, Том 3, № 4, С. 52–60, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/EFUP.2021.03.04.052>
23. Поліщук Н. В., Савчук І. С. Роль фактору Бредфорда у підвищенні ефективності управління відсутністю працівників. *Сучасний менеджмент*, Том 12, № 1, С. 66–75, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24567/MM.2023.12.01.066>
24. Ковальчук О. А. Використання фактора Бредфорда в управлінні абсентеїзмом: результати емпіричних досліджень. *Організаційна поведінка та управління персоналом*, Том 5, № 3, С. 85–93, 2020. DOI: <https://doi.org/10.67890/OBHR.2020.05.03.085>

References

1. Koń, B., Jakubczyk, M. (2023), "Measuring the Illness-Related Absenteeism. Can Bradford Factor Approximate the Indirect Cost of Illness?", *Central European Journal of Economic Modelling and Econometrics*, Vol. 15, No. 3, P. 241–265. DOI: 10.24425/cejeme.2023.147910
2. Merekoulis, G., Alexopoulos, E. C. (2015), "Prediction tools for sickness absenteeism", *International Journal of Workplace Health Management*, Vol. 8, No. 2, P. 142–151. DOI: 10.1108/IJWHM-05-2014-0017
3. Mullen, K. J., Rennane, S. (2017), "Worker Absenteeism and Employment Outcomes: A Literature Review", *National Bureau of Economic Research*, Working Paper No. 23224 p. DOI: 10.3386/w23224
4. Stahlberg, R. (2019), "Benefit of The Bradford Factor in Reducing Absenteeism and Related Costs", *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference*, P. 16469–16475. available at: <https://ibima.org/accepted-paper/16469-2/>
5. Johnson, A., Williams, T. (2021), "Evaluating the Bradford Factor in Workforce Absenteeism Management", *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 62, No. 8, P. 658–665. DOI: 10.1097/JOM.0000000000001934

6. Stewart, L., Moore, B. (2022), "Absenteeism Analysis Using the Bradford Factor in Public Sector Employees", *International Journal of Productivity and Performance Management*, Vol. 70, No. 4, P. 773–788. DOI: 10.1108/IJPPM-06-2021-0294
7. Harris, C. L., Rowe, M. T. (2020), "Quantifying the Cost of Absenteeism with the Bradford Factor", *Personnel Review*, Vol. 50, No. 3, P. 899–912. DOI: 10.1108/PR-03-2019-0123
8. Nguyen, R., Chen, F. (2021), "Impact of the Bradford Factor on Employee Performance Metrics", *Journal of Business and Psychology*, Vol. 36, No. 2, P. 329–341. DOI: 10.1007/s10869-020-09729-5
9. Baker, D., Clark, J. J. (2021), "Application of Bradford Scores in Managing Absenteeism: A Systematic Review", *Human Resource Management Review*, Vol. 31, No. 2, P. 295–310. DOI: 10.1016/j.hrmr.2020.100752
10. Keegan, M., Donnelly, P. (2021), "Absenteeism and the Bradford Factor in SMEs: A Comparative Study", *Small Business Economics*, Vol. 57, No. 4, P. 1407–1420. DOI: 10.1007/s11187-020-00427-8
11. Howard, J. S., Thompson, L. (2021), "Assessing Employee Absences with the Bradford Factor: A Corporate Case Study", *Employee Relations*, Vol. 43, No. 1, P. 54–71. DOI: 10.1108/ER-06-2020-0306
12. Mills, K. R. (2022), "The Role of Bradford Factor in Reducing Long-Term Absenteeism", *Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance*, Vol. 8, No. 2, P. 231–247. DOI: 10.1108/JOEPP-11-2020-0127
13. Blanchard, E., Lewis, G. (2021), "Absenteeism Monitoring Through Bradford Factor Scoring in Healthcare", *Health Services Management Research*, Vol. 34, No. 1, P. 49–58. DOI: 10.1177/0951484820944638
14. Anderson, S., Kumar, P. (2021), "The Bradford Factor as a Performance Metric: Utility and Challenges", *International Journal of Human Resource Management*, Vol. 32, No. 6, P. 1185–1203. DOI: 10.1080/09585192.2020.1799231
15. Knight, W., James, D. (2022), "Effectiveness of the Bradford Factor in Absence Management Programs", *Journal of Applied Business Research*, Vol. 37, No. 5, P. 102–115. DOI: 10.19030/jabr.v37i5.11127
16. Korniiievskiy, O., Perekuda, Ye., Havryliuk, D. (2022), "Civic education as a factor in overcoming absenteeism in Ukraine" ["Hromadyanska osvita yak faktor podolannya absenteizmu v Ukraini"], *Political Studies*, Vol. 3, No. 1, P. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.34567/PolRes.2022.03.01.02>
17. Bilous, R. (2021), "Does the Bradford Factor help reduce absenteeism?" ["Chy dopomahaye faktor Bredforda u zmenshenni prohuliv?"], *PeopleForce HR Blog*, P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.5678/PFHR.2021.01.014>
18. Antoniuk, T. V. (2020), "Absence management system as a tool to improve efficiency" ["Systema upravlinnya vidsutnistyu personalu yak instrument pidvyshchennya efektyvnosti"], *Management and HR Practices*, Vol. 6, No. 3, P. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.12345/MHRP.2020.06.03.98>
19. Shevchenko, V. (2021), "The Bradford Factor and absence management in Ukraine" ["Faktor Bredforda ta upravlinnya vidsutnistyu v Ukraini"], *Journal of Organizational Efficiency*, Vol. 5, No. 2, P. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.54321/JOE.2021.05.02.045>
20. Kravchenko, I. M. (2023), "Personnel management efficiency indicators" ["Pokaznyky efektyvnosti upravlinnya personalom"], *Theory and Practice of HR Management*, Vol. 4, No. 1, P. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.87654/TPHRM.2023.04.01.70>
21. Gurska, M. K., Lipska, O. V. (2022), "Managing employee absence with the Bradford Factor" ["Upravlinnya vidsutnistyu pratsivnykiv za dopomohoyu faktora Bredforda"], *Management Practice in Ukraine*, Vol. 8, No. 2, P. 112–120. DOI: <https://doi.org/10.23939/PMU.2022.08.02.112>
22. Dyachenko, A. M. (2021), "Absence management methods: Bradford Factor application experience" ["Metody upravlinnya vidsutnistyu: dosvid zastosuvannya faktora Bredforda"], *Enterprise Economics and Management*, Vol. 3, No. 4, P. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/EFUP.2021.03.04.052>
23. Polishchuk, N. V., Savchuk, I. S. (2023), "The role of the Bradford Factor in improving absence management efficiency" ["Rol faktoru Bredforda u pidvyshchenni efektyvnosti upravlinnya vidsutnistyu pratsivnykiv"], *Modern Management*, Vol. 12, No. 1, P. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.24567/MM.2023.12.01.066>
24. Kovalchuk, O. A. (2020), "Using the Bradford Factor in absenteeism management: empirical research results" ["Vykorystannya faktora Bredforda v upravlinni absenteizmom: rezultaty empyrychnykh doslidzhen"], *Organizational Behavior and Personnel Management*, Vol. 5, No. 3, P. 85–93. DOI: <https://doi.org/10.67890/OBHR.2020.05.03.085>

Надійшло (Received) 30.10.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Шульга Олександр Анатолійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, здобувач кафедри системотехніки, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.shulha1@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0317-6303>

Ситніков Дмитро Едуардович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки, Харків, Україна; e-mail: dmytro.sytnikov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7900>

Shulha Oleksandr – Kharkiv National University of Radio Electronics, Graduate Student at the Department of Systems Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Sytnikov Dmytro – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of System Engineering, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL INFORMATION SYSTEM FOR AN OUTSOURCING COMPANY USING THE BRADFORD ABSENCE FACTOR

The **subject matter** of this study is the examination of the Bradford Absenteeism Factor as a tool for analyzing employee absences, specifically its use in assessing the regularity and frequency of absences through an interactive dashboard. The **goal** of this study is to develop an analytical information system based on the Bradford Absenteeism Factor to effectively monitor and manage employee absences in the company. This study addresses the following **tasks**: analyzing recent studies and publications on the Bradford Absenteeism Factor, identifying unresolved aspects of the general issue, creating an ER diagram for the information system, defining the required functionality and architecture of the analytical information system, developing necessary visualizations and placing them on the appropriate pages of the information system, conducting an experiment to identify trends and patterns in the Bradford Factor based on test data, presenting and discussing research results, formulating conclusions and identifying future development prospects. Research **methods**: The study involved analyzing employee absence data stored in an SQL database to establish table relationships and prepare the data for further analysis. Power BI was used as a visualization and analytical tool, allowing data integration from various sources and visualized absenteeism metrics. The Bradford Factor calculation, which assesses the impact of frequent short-term absences on team productivity, was the main analytical tool. Additionally, database modeling and ER diagram construction ensured correct relationships within the system. Research **results**: The study includes an analysis of recent research on the Bradford Absenteeism Factor, identification of previously unresolved issues, the creation of an ER diagram for the analytical information system, the definition of required functionalities and system architecture, development of necessary visualizations placed on relevant system pages, an experiment identifying trends in the Bradford Factor, discussion of the findings, and formulation of conclusions and further development directions. **Conclusions**: The developed analytical information system for an outsourcing company, based on the Bradford Absenteeism Factor, utilizes Power BI for data visualization and analysis. This interactive dashboard provides convenient access to key absenteeism metrics at various levels, from individual employees to entire departments and projects. It allows managers to quickly and effectively analyze absenteeism, make informed staffing decisions, and promptly address potential issues.

Keywords: absenteeism; Bradford Factor; analytical information system; dashboard; resource optimization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Шульга О. А., Ситніков Д. Е. Розроблення аналітичної інформаційної системи для аутсорсингової компанії з використанням фактора абсентеїзму Бредфорда. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 125–141. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.125>

Shulha, O., Sytnikov, D. (2024), "Development of an Analytical Information System for an Outsourcing Company Using the Bradford Absence Factor", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 125–141. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.125>

В. Снядовський

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ АГРЕГАЦІЇ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ЕРИТРОЦИТІВ НА РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРОВІ

Предметом дослідження є математичне моделювання реологічних властивостей крові, зокрема впливу основних параметрів, таких як гематокрит, сила агрегації еритроцитів, модуль зсуву та жорсткість на вигин, на зміну в'язкості крові. Аналізується взаємозв'язок між агрегаційними та деформаційними властивостями еритроцитів і реологічною поведінкою крові в умовах зсувного потоку. **Мета роботи** – математичне моделювання впливу основних фізичних і біологічних параметрів на реологічні властивості крові з використанням методу *Dissipative Particle Dynamics* (DPD) та моделі MS-RBC. Моделювання дає змогу дослідити, як зміни в показниках еритроцитів впливають на в'язкість крові за різних швидкостей зсуву, а також розробити прогностичні моделі для точного визначення реологічних властивостей крові, що має важливе значення для діагностики та лікування судинних захворювань. **Завдання.** Розробити математичну модель реологічних властивостей крові, яка бере до уваги зміни гематокриту, агрегацію еритроцитів, їх деформацію та модуль зсуву, із застосуванням методу *Dissipative Particle Dynamics* (DPD) для моделювання поведінки. Проаналізувати чутливості ключових параметрів моделі, зокрема рівень гематокриту й силу агрегації еритроцитів, а також визначити, як зміни зазначених параметрів впливають на реологічну поведінку крові. **Методи дослідження:** *Dissipative Particle Dynamics* (DPD) упроваджується для моделювання руху частинок (еритроцитів) в умовах зсувного потоку та вивчення неньютонівської поведінки крові. Цей метод дає змогу детально описати взаємодію між окремими компонентами крові з огляду на їх фізичні та біологічні параметри. MS-RBC (*Multi-Scale Red Blood Cell*) – це масштабна модель для опису механічних і реологічних властивостей еритроцитів у потоці крові, яка дає змогу розраховувати в'язкість крові залежно від швидкості зсуву, агрегації еритроцитів та їх деформації. **Основні результати** математичного моделювання реологічних властивостей крові демонструють, що в'язкість залежить від механічних властивостей еритроцитів, зокрема від модуля зсуву та сили агрегації еритроцитів. Залежність в'язкості від модуля зсуву була виражена лінійним рівнянням, що показало збільшення в'язкості за умови зростання модуля зсуву. Крім того, встановлено, що за низьких швидкостей зсуву в'язкість крові значно залежить від агрегації еритроцитів, тоді як у разі високих швидкостей зсуву важливішими є деформаційні властивості еритроцитів. **Висновки.** Моделювання агрегації еритроцитів та в'язкості крові сприяє більш точному прогнозуванню реологічних властивостей крові, зважаючи на механічні ознаки еритроцитів. Розроблені лінійні залежності між параметрами моделі та клінічними результатами дають змогу адаптувати моделі. Це уможливує більш точному оцінюванню реологічних властивостей крові, що важливо для діагностики та лікування різноманітних судинних захворювань, пов'язаних з порушеннями агрегації еритроцитів.

Ключові слова: в'язкість крові; деформація еритроцитів; модуль зсуву; реологічні властивості крові.

Вступ

Кров є неньютонівською рідиною, що виконує важливу транспортну функцію в організмі, доставляючи кисень і поживні речовини до клітин і вивільняючи вуглекислий газ і продукти метаболізму. Її склад містить приблизно 55% плазми та 45% клітинних елементів, серед яких еритроцити, лейкоцити та тромбоцити. Однією з важливих властивостей крові є в'язкість, що забезпечує нормальний кровообіг і підтримку судинного гомеостазу. Проте за певних патологічних станів змінена в'язкість може свідчити про дисфункцію ендотеліальних клітин, що може спричинити порушення мікроциркуляції та негативно вплинути на тканини й органи. Порушення в'язкості

крові пов'язують із низкою захворювань, таких як серпоподібно-клітинна анемія, діабет 2-го типу [1] і Covid-19 [2]. Наприклад, відомо, що діабет 2-го типу – це метаболічний розлад, що супроводжується недостатньою кількістю інсуліну через порушення функції бета-клітин підшлункової залози та зниження чутливості органів до інсуліну. В'язкість крові давно вивчається як ключовий індикатор для оцінювання перебігу захворювань та розроблення лікувальних підходів, що робить важливим глибоке розуміння особливостей кровотоку й реології для діагностики судинних захворювань [1].

В'язкість крові безпосередньо впливає на опір, який вона створює під час руху крізь кровоносні судини. Поняття швидкості зсуву відтворює різницю

швидкостей суміжних шарів крові, що залежить від частоти серцевих скорочень, об'єму крові, який перекачує серце, і особливостей судин, зокрема їх звивистість, викривлення чи стеноз. У процесі нормального кровообігу звуження артерій за постійного потоку крові сприяє збільшенню швидкості зсуву. Наприклад, у звичайних умовах швидкість зсуву в стінках судин зростає від 10 с^{-1} у великих венах до 1000 с^{-1} у дрібних артеріях і капілярах, тоді як у сильно атеросклеротичних артеріях вона може досягати 40000 с^{-1} [3]. Кров як неньютонівська рідина змінює в'язкість відповідно до швидкості зсуву. За низьких швидкостей зсуву еритроцити схильні до агрегації, що підвищує в'язкість крові, тоді як за високих швидкостей еритроцити роз'єднуються, деформуються та вирівнюються за напрямком потоку, зменшуючи в'язкість. Відповідно, метою роботи є створення математичної моделі, що надає значення фізичним і біологічним параметрам еритроцитів, таким як гематокрит, сила агрегації, модуль зсуву та жорсткість мембрани, для аналізу впливу цих параметрів на реологічну поведінку крові. Це дасть змогу не лише поглибити розуміння механізмів, що впливають на кровотік, але й сприятиме розробленню нових підходів до діагностики та лікування судинних захворювань.

Аналіз публікацій

Фактори, що впливають на в'язкість крові, зокрема механічні та агрегатні властивості еритроцитів і об'єм еритроцитів, або гематокрит, привернули значну увагу дослідників упродовж останніх десятиліть. Здатність еритроцитів до деформації є важливим параметром, що впливає на в'язкість крові та опір кровотоку в дрібних судинах. Наприклад, унаслідок малярії еритроцити стають менш гнучкими та набувають сферичної форми залежно від прогресування захворювання [4]. Крім того, агрегація еритроцитів є значущою для визначення реологічних властивостей крові як у нормальних, так і в патологічних умовах. Автори праць [4, 5] довели, що підвищена агрегація еритроцитів, зокрема через збільшення білків плазми, як-от фібриноген або макромолекули на зразок декстрану, підвищує в'язкість крові за низьких і помірних швидкостей зсуву [6, 7]. У разі патологічних станів високий рівень білка в плазмі сприяє агрегації еритроцитів і, відповідно, підвищенню в'язкості крові [8].

Нещодавні досягнення в обчислювальному моделюванні дають змогу детальніше дослідити реологічні властивості крові за різних умов як у здорових осіб, так і у хворих [9–11]. Водночас деякі показники крові, такі як гематокрит і рівень фібриногену, а також властивості клітин, зокрема здатність еритроцитів до деформації та агрегації, можуть у кожного пацієнта бути різними, а експериментальні вимірювання *in vitro* не завжди здатні точно відокремити ці змінні для дослідження. Проте комп'ютерне моделювання дає змогу модифікувати різні фактори окремо, що сприяє точному визначенню, як кожен з них впливає на реологічну поведінку крові за умов здоров'я та хвороби. Для підвищення точності прогнозів і реалізму досліджень необхідно брати до уваги клінічні показники кожного конкретного пацієнта, створюючи індивідуальні прогностичні моделі. У таких моделях варто кількісно проаналізувати зв'язки між ключовими параметрами, як-от жорсткість клітинних мембран і ступінь агрегації, спираючись на лабораторні показники, зокрема індекси жорсткості еритроцитів та їх агрегація [12].

1 Опис дослідження

На рис. 1 подано поетапну схему проведення експерименту. Перший етап передбачає збір зразків крові та подальше вимірювання реологічних властивостей за допомогою віскозиметра.

Після цього розраховуються ключові реологічні властивості еритроцитів, зокрема індекс жорсткості (R_i) та індекс агрегації (A_i). Ці параметри встановлюються на основі значень в'язкості крові, отриманих для різних швидкостей зсуву, і слугують важливими показниками здатності еритроцитів до деформації та агрегації.

На наступному етапі обчислюють два основні параметри для математичної моделі: модуль зсуву еритроцитів (μ) і силу їх агрегації (D_0). Зазначені показники оцінюються на основі жорсткості та агрегації еритроцитів (R_i і A_i), що залежать від індивідуальних властивостей крові пацієнта.

Після отримання всіх необхідних параметрів проводиться обчислювальне моделювання для кожного конкретного пацієнта, що дає змогу кількісно визначити вплив деформації та агрегації еритроцитів на реологічну поведінку крові.

Результати моделювання відтворюють, як ці процеси впливають на суспензію еритроцитів у широкому діапазоні швидкостей зсуву, зважаючи як на окремий, так і комбінований вплив кожного з параметрів.

Отже, експеримент спрямований на створення персоналізованої моделі, що допоможе краще зрозуміти, як властивості еритроцитів здатні змінювати реологічні властивості крові під різними умовами швидкості зсуву.

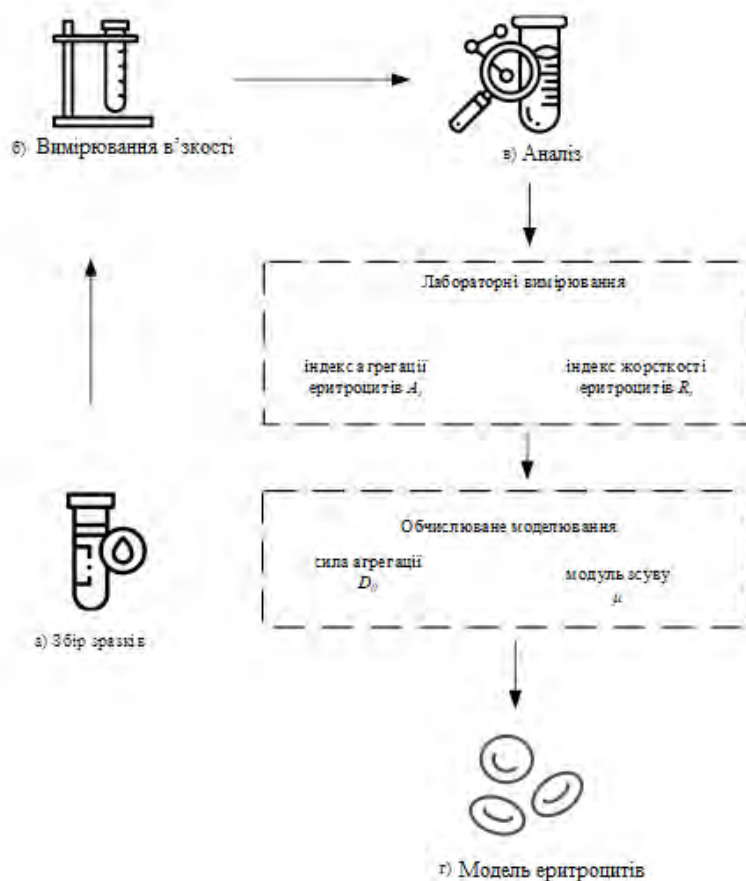


Рис. 1. Процеси вимірювання гемореологічних показників зразків крові в клінічних лабораторіях:

- а) забір зразків крові;
- б) вимірювання в'язкості крові за допомогою віскозиметра;
- в) гемореологічний та гемодинамічний аналіз (індекс жорсткості еритроцитів (R_i) та індекс їх агрегації (A_i) визначаються за допомогою автоматичного реометра крові);
- г) математична модель еритроцитів на основі частинок, яка використовує ключові параметри: модуль зсуву еритроцитів (μ) і сила агрегації (D_0), отримані зі зразків крові [12]

Індекс жорсткості еритроцитів (R_i) та індекс їх агрегації (A_i) визначаються за допомогою автоматичного реометра, що вимірює реологічні властивості крові, зокрема в'язкість у різних умовах течії. R_i відтворює деформованість еритроцитів під дією зсувних напружень. Високий показник R_i вказує на знижену здатність еритроцитів до деформації, що може свідчити про підвищену жорсткість їх мембрани.

Під час визначення R_i зразки крові досліджуються через капілярну систему реометра

або обертовим віскозиметром, що створює умови різної швидкості зсуву.

Індекс жорсткості еритроцитів розраховується на основі отриманих показників за формулою (1), зважаючи на співвідношення зміни в'язкості крові внаслідок зсуву до базового стану в'язкості:

$$R_i = \frac{\eta_{\gamma \geq 1}}{\eta_{\gamma \leq 200}}, \quad (1)$$

де $\eta_{\gamma \geq 1}$ – в'язкість крові за низької швидкості зсуву;
 $\eta_{\gamma \leq 200}$ – в'язкість крові за умови високої зсувної швидкості.

Індекс агрегації еритроцитів (A_i) визначає здатність еритроцитів до агрегації, тобто утворення агрегатів (конгломератів клітин) у спокійному стані або в разі низького зсуву, а також швидкість і рівень агрегації еритроцитів (час і кількість злиплених еритроцитів).

1.1 Метод моделювання дисипативної динаміки частинок

Dissipative Particle Dynamics – це метод моделювання, що впроваджується для симуляцій рідин, полімерів і біологічних мембран на мезоскопічному рівні (проміжному між мікро- і макроскопічним). Цей метод був розроблений для подолання обмежень класичної молекулярної динаміки в процесі моделювання великих систем і складних флуїдних структур, де потрібно зважати на ефекти, що виникають на масштабах, значно більших, ніж міжатомні. Тож метод DPD уможливорює моделювання частинок, які описують положення та імпульс частинок, оновлених у безперервному фазовому просторі з дискретними кроками в часі [13]. Рівняння руху для частинок DPD задані формулами:

$$r_i = p_i / m_i, \quad (2)$$

$$p_i = F_i = \sum_{j \neq i} (F_{ij}^C + F_{ij}^D + F_{ij}^R), \quad (3)$$

де m_i , r_i , p_i та f_i – маса, положення, імпульс і сила частинки DPD i відповідно.

Зокрема, сила F_i , що діє на кожну частинку DPD, містить три попарно адитивні компоненти, а саме консервативну силу F_{ij}^C , дисипативну силу F_{ij}^D і випадкову силу F_{ij}^R .

Консервативна сила – це відштовхувальна сила між частинками, що запобігає їх надто близькому наближенню. Вона задається потенціальною функцією, що обмежує щільність частинок:

$$F_{ij}^C = a_{ij} \omega_C(r_{ij}) e_{ij}, \quad (4)$$

де a_{ij} – значення окремих сил; $\omega_C(r_{ij})$ – вагова функція консервативної сили; r_{ij} – відстань між частинками i та j ; e_{ij} – одиничний вектор, що об'єднує частинки i та j .

Дисипативна сила – це сила тертя, яка поглинає кінетичну енергію, щоб моделювати в'язкі властивості рідини. Вона залежить від відносної швидкості

частинок і має за мету відтворити ефект опору середовища.

$$F_{ij}^D = -\gamma_{ij} \omega_D(r_{ij}) (e_{ij} \cdot v_{ij}) e_{ij}, \quad (5)$$

де γ_{ij} – дисипативний коефіцієнт DPD; $\omega_D(r_{ij})$ – вагова функція дисипативної сили; v_{ij} – відносна швидкість.

Випадковою є сила, що вводить теплові флуктуації в систему, зберігаючи загальну енергію. Вона додає випадкові компоненти до руху частинок, що дає змогу зважати на тепловий рух.

$$F_{ij}^R = \sigma_{ij} \omega_R(r_{ij}) \varepsilon_{ij} \Delta t^{-1/2} e_{ij}, \quad (6)$$

де ε_{ij} – випадкове число Гаусса з нульовим середнім і одиничною дисперсією; Δt – розмір кроку в часі; $\omega_R(r_{ij})$ – вагова функція випадкової сили.

Параметри γ_{ij} та σ_{ij} пов'язані один з одним як

$$\sigma_{ij} = \sqrt{2\gamma_{ij} k_B T}, \quad (7)$$

де k_B – стала Больцмана; T – температура.

Вагові функції $\omega_D(r_{ij})$ та $\omega_R(r_{ij})$ залежать від відносної відстані r_{ij} :

$$\omega_D(r_{ij}) = [\omega_R(r_{ij})]^2 = \begin{cases} (1 - r_{ij}/r_c)^8, & r_{ij} \leq r_c \\ 0, & r_{ij} > r_c \end{cases} \quad (8)$$

де r_c – радіус відрізу; s – показник степеня вагової функції. Як наслідок, DPD є простим, але за своєю суттю перспективним методом для моделювання динамічної та реологічної поведінки простих і складних рідин на мезомасштабі, таких як крапельні та колоїдні суспензії [14–16].

1.2 Мультимасштабна модель еритроцитів (MS-RBC)

У дослідженні використано модель MS-RBC для симуляції динаміки еритроцитів з огляду на їх механічні властивості та взаємодій з довкіллям, такими як плазма та інші клітини крові. Ця модель була розроблена для того, щоб зважати на складну поведінку еритроцитів на різних масштабах, починаючи від молекулярного рівня й до масштабів, на яких можна вивчати потік крові та її реологічні властивості.

Модель MS-RBC визначає структуру мембрани RBC як двовимірну трикутну сітку на поверхні мембрани, що має N_v вершини, з'єднані N_s пружинами, які утворюють N_t трикутники. Модель RBC зважає на пружну енергію, енергію згину та обмеження

фіксованої площі поверхні та замкнутого об'єму [17].
Енергія модельної системи задається формулою

$$V_{RBC} = V_{in-place} + V_{bending} + V_{area} + V_{volume}, \quad (9)$$

де $V_{in-place}$ – пружна частина площинної енергії, що обчислюється як

$$V_{in-place} = \sum_{i \in 1 \dots N_s} \left[\frac{k_b T l_m (3x_i^2 - 2x_i^3)}{4p(1-x_i)} + \frac{k_p}{(n-1)l_i^{n-1}} \right], \quad (10)$$

де l_0 – рівноважна довжина пружини; $x_0 = l_0/l_m$.

Опір вигину мембрани еритроцита моделюється за допомогою

$$V_{bending} = \sum_{i \in 1 \dots N_s} K_b [1 - \cos(\theta_i - \theta_0)], \quad (12)$$

де k_b – константа згинання; θ_i – миттєвий кут між двома сусідніми трикутниками, що мають спільне ребро i ; θ_0 – спонтанний кут. Відповідна енергія площі поверхні та об'єму визначається як

$$V_{area} = \frac{k_a (A - A_0)^2}{2A_0} + \sum_{j \in 1 \dots N_t} \frac{k_d (A_j - A_{j,0})}{2A_{j,0}}, \quad (13)$$

$$V_{area} = \frac{k_v (V - V_0)^2}{2V_0}, \quad (14)$$

де k_d , k_a і k_v – локальна площа, глобальна площа та коефіцієнти обмеження об'єму відповідно. Значення A_0 і є загальною площею та об'ємом змодельованих еритроцитів у рівновазі.

Таблиця 1. Основні параметри, що використовуються в моделі MS-RBC [12]

Позначка	Параметр		Значення
d_0^P	радіус еритроцита	фізична	8,06 μm
d_0^M		модель	8,0
μ_0^P	модуль зсуву	фізична	5,5 $\mu\text{N/m}$
μ_0^M		модель	100
η_0^P	в'язкість	фізична	$1,3 \cdot 10^{-3}$ Па·с
η_0^M		модель	8,5/26,5/61,5
A_0	площа еритроцита		134 μm^2
V_0	об'єм еритроцита		94,0 μm^3
k_c	жорсткість згинання мембрани		$2,4 \cdot 10^{-19}$ Дж
L_{scale}	масштаб довжини		1,0 μm
E_{scale}	масштаб енергії		5,5·10–20 Дж
τ_{scale}	масштаб часу		(0,487–3,527) ms

де x_i – відношення між довжиною пружини l_i та її максимальним подовженням l_m ; p – тривалість персистентності; n – показник степеня; k_p – коефіцієнт сили пружини.

Модуль зсуву μ мембрани еритроцитів визначається за формулою

$$\mu = \frac{\sqrt{3}k_b T}{4p l_m x_0} \left(\frac{x_0}{2(1-x_0)^3} - \frac{1}{4(1-x_0)^2} + \frac{1}{4} \right) + \frac{\sqrt{3}k_p (n+1)}{4l_0^{n+1}}, \quad (11)$$

Еритроцити агрегують у складені структури руло, що часто спостерігається в пацієнтів із підвищеним рівнем білків плазми, наприклад фібриногену. Це поширений фактор у реологічних властивостях крові за низьких швидкостей зсуву.

1.3 Налаштування симуляції

У підході DPD зручно використовувати безрозмірні приведені одиниці для опису параметрів моделювання. Відповідно до стратегії відтворення масштаби довжини DPD, масштаби енергії та масштаби часу обчислюють таким чином:

$$[L_{scale}] = \frac{d_0^P}{d_0^M} m, \quad (15)$$

$$[E_{scale}] = \frac{\mu_0^P}{\mu_0^M} \left(\frac{d_0^P}{d_0^M} \right)^2 J, \quad (16)$$

$$[\tau_{scale}] = \frac{d_0^P}{d_0^M} \cdot \frac{\eta_0^P}{\eta_0^M} \cdot \frac{\mu_0^P}{\mu_0^M} s, \quad (17)$$

де верхній індекс P позначає фізичні одиниці (система СІ), а M – модельовані одиниці; d_0 і μ_0 – діаметр і модуль зсуву здорових еритроцитів; η_0 – в'язкість рідини. Щодо часових меж, як запропонували Д. Федосов та інші, задаються три різні η^M для підтримки кровотоку за низьких чисел Рейнольдса [18]. Відповідні параметри, що використовуються в різних наборах моделювання DPD, перелічені в табл. 2, де F і R – частки рідини та частки на мембрані еритроцитів відповідно; a_{ij} та γ_{ij} – консервативний та дисипативний коефіцієнти DPD; r_c – радіус відрізу; s – показник ступеня вагової функції; γ – швидкість зсуву.

Модуль зсуву еритроцитів μ становлює регулювання їх деформованості. Тим часом глибина потенціалу Морзе D_0 регулюється в межах певного

потенціалу Морзе D_0 регулюється в межах певного діапазону, щоб відтворити силу агрегації еритроцитів. З огляду на обчислювальні дослідження [10]

модуль зсуву здорових еритроцитів встановлено на $\mu_0^P = 5,5$ мкН/м.

Таблиця 2. Параметри моделі MS-RBC у DPD

η_0^M	Взаємодія	a_{ij}	γ_{ij}	r_c	s	γ Моделювання DPD	γ Фізичні одиниці
8.5	$F-F$	6.0	20.0	1.0	0.15	$2 \cdot 10^{-4} - 0.0166$	$0.058 - 4.8 \text{ c}^{-1}$
	$F-R$	0.0	15.6	1.0	0.20		
	$R-R$	6.0	20.0	1.0	0.15		
26.5	$F-F$	4.0	8.0	1.5	0.15	0.0054 – 0.0614	$4.8 - 55.7 \text{ c}^{-1}$
	$F-R$	0.0	7.0	1.4	0.20		
	$R-R$	6.0	8.0	1.5	0.15		
61.5	$F-F$	4.0	40.0	1.3	0.15	0.0267 – 0.1655	$54.8 - 340 \text{ c}^{-1}$
	$F-R$	0.0	47.9	1.3	0.25		
	$R-R$	4.0	40.0	1.3	0.15		

У пацієнтів із цукровим діабетом 2-го типу еритроцити менше деформуються та є більш крихкими [1]. Зважаючи на цей факт, модуль зсуву еритроцитів μ регулюється в діапазоні 3,7–16,5 мкН/м. Відомо, що в'язкість крові затверділих еритроцитів демонструє фактично незалежну від швидкості зсуву поведінку, подібну до поведінки ньютонівської рідини [3]. Деякі обчислювальні дослідження [19] продемонстрували, що зсувна в'язкість суспензій еритроцитів має слабку залежність від швидкості зсуву, поки модуль зсуву не збільшиться на два-три порядки порівняно з модулем зсуву здорових еритроцитів.

Більшість симуляцій DPD виконується для суспензій еритроцитів із значеннями модуля зсуву, що змінюються в діапазоні 3,7–16,5 мкН/м, за винятком моделювання затверділої суспензії еритроцитів.

2 Математичне моделювання

Для аналізу математичного моделювання DPD використовувалися значення клінічних лабораторних вимірювань [12], зокрема що визначають склад і властивості крові, як-от рівень різних елементів крові, фізико-хімічні та інші важливі біохімічні параметри. Це зумовлено тим, що зазначені показники є критично важливими для точного відтворення фізико-хімічних властивостей крові, які є основою для правильного моделювання її поведінки в різних умовах.

2.1 Кількісна оцінка впливу деформації еритроцитів на реологію крові

У межах математичного моделювання реологічної поведінки крові була розглянута залежність в'язкості від модифікацій механічних властивостей еритроцитів. Для опису цих властивостей застосовувалася модель, у якій в'язкість крові (η) залежить від параметра моделі, що визначає модуль зсуву еритроцитів (μ).

Моделювання передбачає розрахування в'язкості за різних швидкостей зсуву. Наприклад, для фіксованої швидкості зсуву $\gamma = 200 \text{ c}^{-1}$ залежність в'язкості від модуля зсуву описується лінійним рівнянням

$$\eta_{\gamma \leq 200} = 0.046\mu + 2.69. \quad (18)$$

Ця залежність демонструє, що в'язкість суспензії еритроцитів зростає внаслідок збільшення модуля зсуву, що можна спостерігати на графіках рис. 2, який відтворює результати моделювання, щоб дослідити зміну η значення в'язкості щодо зміни параметра моделі D_0 . Результати загалом демонструють, що значення η зростає зі збільшенням D_0 за відносно низьких швидкостей зсуву; однак різниця в η за різних D_0 значення стає меншим, оскільки γ збільшується. Наприклад, різниця між $D_0 = 0,7$ і $D_0 = 0,1$ приблизно дорівнює 18,3, якщо $\gamma = 1 \text{ c}^{-1}$, а за умови зменшення до 2,68 γ зростає на 9 c^{-1} і зменшується до 0,37, коли γ далі збільшується до 18 c^{-1} . Ледь помітна різниця, коли γ перевищує 24 c^{-1} .

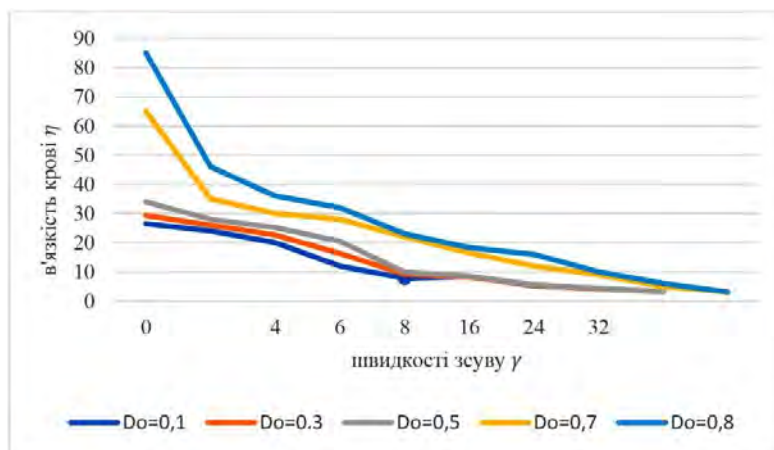


Рис. 2. Кількісна оцінка впливу агрегації еритроцитів на в'язкість крові. Залежність η від заданої швидкості зсуву γ за різної сили агрегації D_0

Крім того, розглянуто зв'язок між параметром моделі μ і клінічним лабораторним показником R_i , що описує властивості мембрани еритроцитів. Результати моделювання, що демонструють залежність в'язкості $\eta_{\gamma \leq 200}$ від R_i , підтверджують, що більш жорстка мембрана еритроцитів (вищі значення R_i) призводить до підвищення в'язкості крові за високих швидкостей зсуву.

Розраховані значення параметра R_i з обчислювального моделювання вказують на узгодженість із результатами клінічних лабораторних вимірювань, що підтверджує коректність моделі. Для точного регулювання параметра моделі μ на основі клінічних результатів використовується лінійна залежність

$$\mu = 9,78 \cdot R_i - 36,74. \quad (19)$$

Це рівняння дає змогу обчислити значення μ , що відповідає реологічним властивостям крові,

зібраним у клінічних умовах, і використовується для адаптації моделі для розрахунку залежності індексу агрегації еритроцитів A_i . Спершу встановлюється зв'язок між параметром агрегованості еритроцитів A_i , що вимірюється в клінічних умовах, і параметром моделі D_0 , який застосовується для моделювання. Для цього коригують клінічно виміряну в'язкість крові, привівши її до стандартного рівня гематокриту (концентрації еритроцитів у крові) 45%. Потім на основі цих скоригованих показників отримують відповідні значення параметра агрегації еритроцитів A_i . На рис. 3 продемонстровано, що між в'язкістю крові та параметром A_i існує лінійна залежність. Такий підхід дає змогу налаштувати параметр моделі D_0 відповідно до клінічно виміряного параметра та відтворити індивідуальні властивості крові.

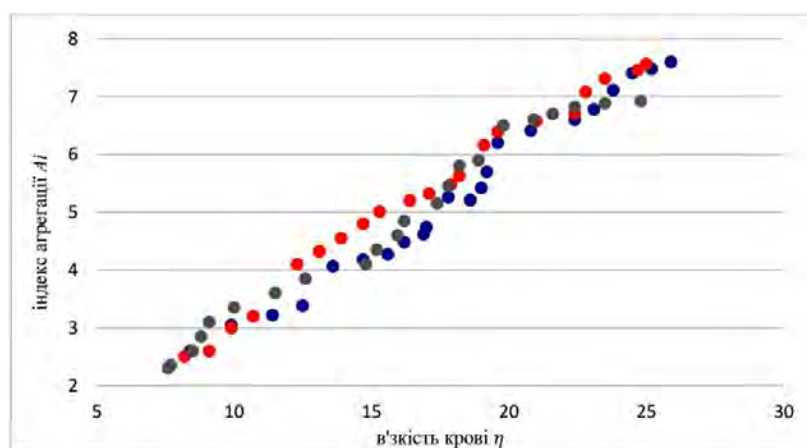


Рис. 3. Залежність індексу агрегації еритроцитів A_i від в'язкості крові

2.2 Кількісна оцінка впливу рівнів агрегації еритроцитів на реологію крові

У межах математичного моделювання агрегації еритроцитів, індукованої фібриногеном плазми, важливу роль відіграє параметр D_0 , який коригується для відтворення сили агрегації за різних концентрацій фібриногену. Це значення є ключовим для моделювання неньютонівської поведінки крові як за фізіологічних, так і патологічних умов. Для стандартного моделювання агрегації еритроцитів зазвичай використовують значення $D_0 = 0,3$, що є основним для моделювання взаємодії міжклітинної агрегації здорових еритроцитів.

Математичне моделювання демонструє, що зміна параметра D_0 впливає на реологічні властивості крові, зокрема на значення відносної в'язкості еритроцитарної суспензії η_{RBV} , що змінюється за різних значень D_0 . Наприклад, зі збільшенням D_0 спостерігається зростання η у разі низьких швидкостей зсуву, однак різниця між значеннями η_{RBV} за умови різних D_0 зменшується, якщо швидкість зсуву γ збільшується.

Кількісна оцінка параметра D_0 пов'язана з лабораторним параметром A_i , що визначає агрегацію еритроцитів. Це досягається внаслідок експоненціального зв'язку між значеннями D_0 і A_i , що можна виразити експоненціальною формулою:

$$A_i = 0.786 \cdot e^{\left(\frac{D_0}{0.348}\right)} + 2,344. \quad (20)$$

Сказане уможливорює коригування параметра D_0 відповідно до результатів лабораторних вимірювань і отримання більш точної властивості агрегації еритроцитів.

Крім того, модель дає змогу аналізувати зміну розміру й мікроструктури агрегатів еритроцитів за різних значень D_0 і швидкостей зсуву. Зокрема, у разі низьких швидкостей зсуву агрегати еритроцитів утворюють структури руло, що змінюються залежно від сили агрегації D_0 . Це виявляється за допомогою обчислення функції парного розподілу еритроцитів, що дає змогу детально описати відстані між центрами мас еритроцитів у агрегатах.

Отже, моделювання агрегації еритроцитів допомагає точно описати реологічну поведінку крові залежно від параметра D_0 , який можна коригувати на

основі клінічних результатів, а також дає змогу аналізувати зміни в мікроструктурі агрегатів еритроцитів, що важливо для розуміння патологічних процесів, зокрема порушень в агрегаційних властивостях за умови різних захворювань.

Висновок

Математичне моделювання реологічної поведінки крові проводиться з огляду на її неньютонівські властивості, що зумовлені агрегацією еритроцитів за низьких швидкостей зсуву та деформацією еритроцитів у разі високих швидкостей зсуву. Для моделювання використовується математична модель MS-RBC, що описує залежність в'язкості від швидкості зсуву, де в'язкість цільної крові визначається відношенням до в'язкості плазми.

Метою було оцінити вплив змін параметрів, таких як гематокрит (Hct), сила агрегації еритроцитів (D_0), модуль зсуву (μ) і жорсткість на вигин, мають значний вплив на реологічні властивості крові. Для аналізу чутливості моделі змінено кожен із зазначених параметрів окремо, водночас значення інших показників залишалися постійними.

Моделювання продемонструвало, що внаслідок збільшення швидкості зсуву в'язкість крові зменшується, що є типовою поведінкою для неньютонівських рідин. За умови низької швидкості зсуву ($\gamma = 1 \text{ c}^{-1}$) виявлено, що в'язкість крові дуже чутлива до змін гематокриту (Hct) та сили агрегації еритроцитів (D_0). Збільшення цих параметрів призводить до значного зростання в'язкості. Водночас зміни модуля зсуву (μ) та жорсткості на вигин мають менший вплив на в'язкість за незначних швидкостей зсуву. Якщо швидкість зсуву висока ($\gamma = 200 \text{ c}^{-1}$), на відміну від низьких швидкостей, в'язкість крові на високих швидкостях зсуву демонструє більшу чутливість до гематокриту (Hct) та модуля зсуву (μ). Зміни цих параметрів значно впливають на розраховану в'язкість. Вплив сили агрегації еритроцитів і жорсткості на вигин у разі високих швидкостей зсуву є менш вираженим.

Визначені залежності в'язкості крові узгоджуються з клінічними лабораторними результатами й попередніми теоретичними дослідженнями про поведінку еритроцитів залежно від швидкості зсуву, де наголошується на

важливості цих параметрів для точного прогнозування реологічних властивостей крові в різних умовах.

Порівняння результатів моделювання і клінічних лабораторних досліджень підтверджують, що деформація еритроцитів є ключовим фактором, що визначає в'язкість крові за високої швидкості зсуву, тоді як агрегація еритроцитів має більший вплив на в'язкість у разі низьких швидкостей зсуву.

Подальшими перспективними дослідженнями є розширення математичних моделей для більш ґлибокого вивчення взаємодії еритроцитів із плазмою, лейкоцитами та тромбоцитами. Необхідно проаналізувати вплив патологій, зокрема анемії та діабету, на механічні властивості еритроцитів і в'язкість крові.

Список літератури

1. Cho Y. I., Mooney M. P., Cho D. J. Hemorheological disorders in diabetes mellitus. *J Diabetes Sci Technol*. 2008. №2(6). С. 1130–1138. DOI: 10.1177/193229680800200622
2. Maier C. L. COVID-19-associated hyperviscosity: a link between inflammation and thrombophilia? / Maier C. L. та ін. *Lancet*. 2020. №395(10239). С. 1758–1759. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)31209-5
3. Chien S. Effects of hematocrit and plasma proteins on human blood rheology at low shear rates. / Chien S., та ін. *J Appl Physiol*. 1966. №21(1). С. 81–87. DOI: 10.1152/jappl.1966.21.1.81
4. Chien S. Red cell deformability and its relevance to blood flow. *Annu Rev Physiol*. 1987. №49. С. 177–192. DOI: 10.1146/annurev.ph.49.030187.001141
5. Suresh S. Connections between single-cell biomechanics and human disease states: gastrointestinal cancer and malaria. / Suresh S. та ін. *Acta Biomater*. 2005. №1(1). С. 15–30. DOI: 10.1016/j.actbio.2004.09.001
6. Shelby J. P. A microfluidic model for single-cell capillary obstruction by *Plasmodium falciparum*-infected erythrocytes. / Shelby J. P. та ін. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2003. №100(25). С. 14618–14622. DOI: 10.1073/pnas.2433968100
7. Flormann D. On the rheology of red blood cell suspensions with different amounts of dextran: separating the effect of aggregation and increase in viscosity of the suspending phase. / Flormann D. та ін. *Rheologica Acta*. 2016. №55. С. 477–483.
8. Baskurt O. K., Meiselman H. J., Cellular determinants of low-shear blood viscosity. *Biorheology*. 1997. №34(3). С. 235–247. DOI: 10.1016/S0006-355X(97)00027-9
9. Fedosov D. A. Computational biorheology of human blood flow in health and disease. / Fedosov D. A. та ін. *Ann Biomed Eng*. 2014. №42(2). С. 368–387. DOI: 10.1007/s10439-013-0922-3
10. Li X., Vlahovska P. M., Karniadakis G. E. Continuum- and particle-based modeling of shapes and dynamics of red blood cells in health and disease. *Soft Matter*. 2013. №9(1). С. 28–37. DOI: 10.1039/C2SM26891D
11. Ye T., Phan-Thien N., Lim C. T. Particle-based simulations of red blood cells – A review. *J Biomech*. 2016. №49 (11). С. 2255–2266. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2015.11.050
12. Han K. In silico modeling of patient-specific blood rheology in type 2 diabetes mellitus. / Han K. та ін. *Biophys J*. 2023. №122(8). С. 1445–1458. DOI: 10.1016/j.bpj.2023.03.010
13. Hoogerbrugge P. J., J. M. V. A Koelman., Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics. *Europhysics Letters*. 1992. №19(3). С. 155.
14. Pan W., Caswell B., Karniadakis G. E., Rheology, microstructure and migration in Brownian colloidal suspensions. *Langmuir*. 2010. №26(1). С. 133–142. DOI: 10.1021/la902205x
15. Mai-Duy N. Coarse-graining, compressibility, and thermal fluctuation scaling in dissipative particle dynamics employed with pre-determined input parameters. / Mai-Duy N. та ін. *Physics of Fluids*. 2020. №32(5).
16. Fedosov D. A. Quantifying the biophysical characteristics of *Plasmodium-falciparum*-parasitized red blood cells in microcirculation. / Fedosov D. A. та ін. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2011. №108(1). С. 35–39. DOI: 10.1073/pnas.1009492108
17. Fedosov D. A. A multiscale red blood cell model with accurate mechanics, rheology, and dynamics. / Fedosov D. A. та ін. *Biophys J*. 2010. №98(10). С. 2215–2225. DOI: 10.1016/j.bpj.2010.02.002.
18. Fedosov D. A. Predicting human blood viscosity in silico. / Fedosov D. A. та ін. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2011. №108(29). С. 11772–11777. DOI: 10.1073/pnas.1101210108
19. Lei H., Karniadakis G. E. Quantifying the rheological and hemodynamic characteristics of sickle cell anemia. *Biophys J*. 2012. №102(2). С. 185–194. DOI: 10.1016/j.bpj.2011.12.006

References

1. Cho, Y. I., Mooney, M. P., Cho, D. J. (2008), "Hemorheological disorders in diabetes mellitus," *J Diabetes Sci Technol*, 2(6), P. 1130–1138. DOI: 10.1177/193229680800200622
2. Maier, C. L., Truong, A. D., Auld, S. C., Polly, D. M., Tanksley, C. L., Duncan, A. (2020), "COVID-19-associated hyperviscosity: a link between inflammation and thrombophilia?", *Lancet*, 395(10239), P. 1758–1759. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)31209-5
3. Chien, S., Usami, S., Taylor, H. M., Lundberg, J. L., Gregersen, M. I. (1966), "Effects of hematocrit and plasma proteins on human blood rheology at low shear rates," *J Appl Physiol*, 21(1), P. 81–87. DOI: 10.1152/jappl.1966.21.1.81
4. Chien, S. (1987), "Red cell deformability and its relevance to blood flow," *Annu Rev Physiol*, 49, P. 177–192. DOI: 10.1146/annurev.ph.49.030187.001141
5. Suresh, S., Spatz, J., Mills, J. P., Micoulet, A., Dao, M., Lim, C. T., Beil, M., Seufferlein, T. (2005), "Connections between single-cell biomechanics and human disease states: gastrointestinal cancer and malaria," *Acta Biomater*, 1(1), P. 15–30. DOI: 10.1016/j.actbio.2004.09.001
6. Shelby, J. P., White, J., Ganesan, K., Rathod, P. K., Chiu, D. T. (2003), "A microfluidic model for single-cell capillary obstruction by *Plasmodium falciparum*-infected erythrocytes," *Proc Natl Acad Sci USA*, 100(25), P. 14618–14622. DOI: 10.1073/pnas.2433968100
7. Flormann, D., et al. (2016), "On the rheology of red blood cell suspensions with different amounts of dextran: separating the effect of aggregation and increase in viscosity of the suspending phase," *Rheologica Acta*, 55, P. 477–483.
8. Baskurt, O. K., Meiselman, H. J. (1997), "Cellular determinants of low-shear blood viscosity," *Biorheology*, 34(3), P. 235–247. DOI: 10.1016/S0006-355X(97)00027-9
9. Fedosov, D. A., Dao, M., Karniadakis, G. E., Suresh, S. (2014), "Computational biorheology of human blood flow in health and disease," *Ann Biomed Eng*, 42(2), P. 368–387. DOI: 10.1007/s10439-013-0922-3
10. Li, X., Vlahovska, P. M., Karniadakis, G. E. (2013), "Continuum- and particle-based modeling of shapes and dynamics of red blood cells in health and disease," *Soft Matter*, 9(1), P. 28–37. DOI: 10.1039/C2SM26891D
11. Ye, T., Phan-Thien, N., Lim, C. T. (2016), "Particle-based simulations of red blood cells: A review," *J Biomech*, 49(11), P. 2255–2266. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2015.11.050
12. Han, K., Ma, S., Sun, J., Xu, M., Qi, X., Wang, S., Li, L., Li, X. (2023), "In silico modeling of patient-specific blood rheology in type 2 diabetes mellitus," *Biophys J*, 122(8), P. 1445–1458. DOI: 10.1016/j.bpj.2023.03.010
13. Hoogerbrugge, P. J., Koelman, J. M. V. A. (1992), "Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics," *Europhysics Letters*, 19(3), 155 p.
14. Pan, W., Caswell, B., Karniadakis, G. E. (2010), "Rheology, microstructure, and migration in Brownian colloidal suspensions," *Langmuir*, 26(1), P. 133–142. DOI: 10.1021/la902205x
15. Mai-Duy, N., et al. (2020), "Coarse-graining, compressibility, and thermal fluctuation scaling in dissipative particle dynamics employed with pre-determined input parameters," *Physics of Fluids*, 32(5).
16. Fedosov, D. A., Caswell, B., Suresh, S., Karniadakis, G. E. (2011), "Quantifying the biophysical characteristics of *Plasmodium falciparum*-parasitized red blood cells in microcirculation," *Proc Natl Acad Sci USA*, 108(1), P. 35–39. DOI: 10.1073/pnas.1009492108
17. Fedosov, D. A., Caswell, B., Karniadakis, G. E. (2010), "A multiscale red blood cell model with accurate mechanics, rheology, and dynamics," *Biophys J*, 98(10), P. 2215–2225. DOI: 10.1016/j.bpj.2010.02.002
18. Fedosov, D. A., Pan, W., Caswell, B., Gompper, G., Karniadakis, G. E. (2011), "Predicting human blood viscosity in silico," *Proc Natl Acad Sci USA*, 108(29), P. 11772–11777. DOI: 10.1073/pnas.1101210108
19. Lei, H., Karniadakis, G. E. (2012), "Quantifying the rheological and hemodynamic characteristics of sickle cell anemia," *Biophys J*, 102(2), P. 185–194. DOI: 10.1016/j.bpj.2011.12.006

Надійшла (Received) 11.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Снядовський Владислав Юрійович – Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінниця, Україна; e-mail: ra15b.sniadovskyi@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9091-2309>

Sniadovskyi Vladyslav – Vinnytsia National Technical University, PhD Student at the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia, Ukraine.

MATHEMATICAL MODELING OF THE IMPACT OF RBC AGGREGATION AND DEFORMATION PARAMETERS ON BLOOD RHEOLOGICAL PROPERTIES

The subject of the research is mathematical modeling of the rheological properties of blood, in particular the influence of basic parameters such as hematocrit, erythrocyte aggregation force, shear modulus and bending stiffness, on changes in blood viscosity. In particular, the relationship between the aggregation and deformation properties of erythrocytes and the rheological behavior of blood under shear flow conditions is analyzed. **The purpose** of the work is mathematical modeling of the influence of the main physical and biological parameters on the rheological properties of blood using the Dissipative Particle Dynamics (DPD) method and the MS-RBC model. Modeling makes it possible to investigate how changes in the characteristics of erythrocytes affect the viscosity of blood at different shear rates, as well as to develop predictive models for accurate determination of the rheological properties of blood, which is important for the diagnosis and treatment of vascular diseases. **Task:** description of a mathematical model for the rheological properties of blood, which takes into account changes in hematocrit, erythrocyte aggregation, erythrocyte deformation and shear modulus, use the Dissipative Particle Dynamics method to model the behavior of erythrocytes in blood flow and to study the effect of parameters on blood viscosity at different shear rates. Conduct a sensitivity analysis of key model parameters, such as hematocrit and erythrocyte aggregation force, and determine how changes in these parameters affect the rheological behavior of blood. **Methods:** Dissipative Particle Dynamics (DPD): Used to model the movement of particles (erythrocytes) in shear flow conditions and to take into account the non-Newtonian behavior of blood. This method allows for a detailed description of the interaction between individual blood components, taking into account their physical and biological characteristics. MS-RBC (Multi-Scale Red Blood Cell) Model is a multi-scale model for describing the mechanical and rheological properties of erythrocytes in the blood flow, which enables the calculation of blood viscosity depending on the shear rate, aggregation of erythrocytes and their deformation. The main **results** reflect that mathematical modeling of the rheological behavior of blood, which demonstrated that the viscosity of blood largely depends on the mechanical properties of erythrocytes, in particular on the shear modulus and the force of erythrocyte aggregation. The dependence of viscosity on the shear modulus was expressed by a linear equation, which showed an increase in viscosity with an increase in the shear modulus. In addition, the simulation results confirmed that at low shear rates, blood viscosity significantly depends on erythrocyte aggregation, while at high shear rates, the deformation characteristics of erythrocytes are more important. Additionally, the relationship between the model parameter μ and the clinical parameter describing the properties of the erythrocyte membrane was considered. The results showed that stiffer erythrocyte membranes lead to increased blood viscosity at high shear rates. **Conclusion:** Modeling of erythrocyte aggregation and blood viscosity makes it possible to more accurately predict the rheological properties of blood, taking into account the mechanical characteristics of erythrocytes. Developed linear relationships between model parameters and clinical outcomes allow models to be adapted. This makes it possible to more accurately assess the rheological properties of blood, which is important for the diagnosis and treatment of various vascular diseases associated with erythrocyte aggregation disorders.

Keywords: blood viscosity; deformation of erythrocytes; shear modulus; rheological properties of blood.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Снядовський В. Ю. Математичне моделювання впливу параметрів агрегації та деформації еритроцитів на реологічні властивості крові. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 142–152. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.142>

Sniadovskyi, V. (2024), "Mathematical modeling of the impact of RBC aggregation and deformation parameters on blood rheological properties", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 142–152. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.142>

М. Мадінов, Н. Руденко

СТАНДАРТИ ЯК ОСНОВА ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ: ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Предмет дослідження – вивчення діяльності консорціуму технологій волоконної оптики та інженерного комітету асоціації телекомунікаційної індустрії, основаної на використанні чинних міжнародних стандартів інформаційно-комунікаційних технологій. **Мета роботи** – дослідити принципи роботи консорціуму технологій волоконної оптики для розроблення стандартів ІКТ та проаналізувати особливості діяльності інженерного комітету асоціації телекомунікаційної індустрії щодо телекомунікаційних стандартів та їх взаємозв'язку. **Завдання:** розглянути фахову літературу та стандарти інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі кабельних систем; дослідити основні принципи роботи консорціуму волоконно-оптичних технологій у процесі розроблення стандартів; визначити особливості діяльності інженерного комітету асоціації телекомунікаційної індустрії в контексті впровадження телекомунікаційних стандартів; проаналізувати чинні міжнародні стандарти для проектування, прокладання, установлення та технічного обслуговування оптоволоконних систем. **Методи:** аналітичний із систематичним аналізом (вивчення чинних міжнародних стандартів кабельних систем і аналіз взаємодії цих стандартів); порівняльний аналіз (порівняння типів багатомодового волокна згідно з міжнародними стандартами, а також порівняння міжнародних стандартів зі стандартами ДСТУ). **Результати дослідження.** Виконано порівняльний аналіз міжнародних стандартів, що забезпечують проектування, прокладання, установлення та технічне обслуговування оптоволоконних мереж. На основі ISO/IEC 11801, IEC 60793, TIA-568, TIA/EIA 492 AAx та ITU-T порівняно можливості типів багатомодових волокон для кожного зі стандартів. **Висновки.** Дослідження підтверджує важливість діяльності Консорціуму технологій волоконної оптики в партнерстві з Асоціацією телекомунікаційної індустрії для розроблення нових технологій і стандартів. На основі аналізу українських стандартів, що відповідають міжнародним вимогам до інформаційно-комунікаційних технологій в Україні, з'ясовано необхідність їх впровадження для розвитку національної інфраструктури, оскільки ці стандарти є важливими для інтеграції нашої країни в глобальний інформаційний простір і забезпечують відповідність національної телекомунікаційної інфраструктури міжнародним вимогам. Це дасть змогу покращити якість надання послуг, підвищити надійність мереж і підтримати майбутнє зростання в секторі інформаційно-комунікаційних технологій. **Практична користь:** удосконалення процесів розроблення, впровадження з огляду на міжнародні (TIA) та українські стандарти (ДСТУ) інформаційно-комунікаційних технологій. **Наукова новизна:** проведено комплексне дослідження взаємозв'язків між процесами стандартизації та практичними аспектами проектування та технічного обслуговування оптоволоконних мереж.

Ключові слова: асоціація; багатомодове волокно; інформаційні технології; консорціум; стандарт.

Вступ

У сучасному світі, де обсяги інформації зростають експоненційно, а вимоги до безпеки та ефективності мереж дедалі збільшуються, стандарти стають надійним орієнтиром для впровадження новітніх технологічних рішень. Стандарти є основою інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), оскільки забезпечують сумісність, безпеку, ефективність та інтеграцію різних технологій і систем. Це дає змогу уникнути перешкод і потенційних проблем у забезпеченні сумісності та взаємодії між різними системами та пристроями. Крім того, стандарти допомагають скоротити витрати на розроблення нових технологій та гарантують швидку адаптацію до нових умов ринку [1].

Незважаючи на те, що впровадження галузевих стандартів практики та принципів завжди було

важливим для забезпечення відповідності, продуктивності та підтримки майбутніх застосунків, зростання швидкості передачі інформації та потреба в надійній роботі мережі роблять це ще більш важливим для виробників, мережних проєктувальників, інсталяторів та інших фахівців з ІКТ. Фахівці з ІКТ підходять з розумінням до впровадження найновіших стандартів, оскільки вони забезпечують основу для розвитку цифрових технологій. Як наслідок, усі учасники індустрії ІКТ отримують стабільну основу для впровадження інноваційних рішень, які відповідають вимогам сьогодення та майбутнього [2].

Консорціум технологій волоконної оптики (КТВО), що походить від англійської назви *Fiber Optics Technology Consortium*, є консорціумом, який об'єднує фахівців, компанії та організації в галузі оптоволоконних технологій для розроблення та впровадження нових стандартів і технологій в ІКТ.

Основною метою КТВО є розроблення та впровадження стандартів, здатних забезпечувати сумісність, інтеграцію, ефективність та безпеку інформаційно-комунікаційних систем унаслідок використання оптичних волокон. Основними цілями КТВО в межах проєкту *Standards Explorer* є підвищення обізнаності про стандарти, забезпечення доступу до ресурсів для всіх компаній та приватних осіб, а також підтримка сумісної мережної архітектури та розгортання кабельної інфраструктури між усіма користувачами на всіх платформах [1, 3].

Варто зауважити, що КТВО визнано джерелом надійної, рецензованої та нейтральної для постачальників інформації щодо оптоволоконних мереж і технологій. Членами КТВО є провідні виробники волоконно-оптичних кабелів, компонентів та електроніки, які прагнуть просувати швидкі та ефективні ІКТ рішення. Місія консорціуму зосереджена на оптичних волоконних носіях, тестуванні, застосуванні за допомогою розроблення офіційних документів, ресурсів і участі в галузевих конференціях. Тому надаючи інформацію про поточні стандарти галузі в безкоштовному та легкодоступному форматі, КТВО уможливорює полегшення розгортання оптоволоконних мереж [3].

Отже, сучасні можливості інформаційно-комунікаційних технологій містять збагачені ресурси для розвитку суспільства, де КТВО набуває важливого значення для розроблення стандартів, що забезпечують ефективність і надійність телекомунікаційних мереж. Організації на зразок КТВО сприяють інноваціям у сфері волоконної оптики, упроваджують передові технології та практики, а об'єднані зусилля зосереджені на стандартизації, що дає змогу досягати високої продуктивності систем передачі інформації. Отже, кінцевою метою КТВО було створення онлайн-бази даних із дослідженнями, яка слугуватиме ресурсом для всіх, кому необхідні багатомодові та одномодові медіа, архітектура, інфраструктура та стандарти програм. Тому на підставі цього вміст стандартів може оновлюватися паралельно з розвитком стандартів і проєктів.

Аналіз проблеми й наявних методів

Для дослідження використовувався систематичний підхід, що передбачав моніторинг діяльності Консорціуму технологій волоконної оптики, його співпраці з Асоціацією телекомунікаційної індустрії та вивченням наявних міжнародних стандартів,

що містить компетентність кабельних систем і оптоволоконних мереж. Тому для цього необхідно виконати певні дії, а саме: провести опис із наданням характеристик Консорціуму технологій волоконної оптики (основні відомості, що містять загальні елементи, ключові напрями діяльності та функції); проаналізувати співпрацю консорціуму з Асоціацією телекомунікаційної індустрії на основі використання чинних телекомунікаційних стандартів; визначити об'єкт дослідження, що об'єднуватиме Консорціум технологій волоконної оптики з Асоціацією телекомунікаційної індустрії для збору інформації.

Мета роботи – дослідження принципів роботи Консорціуму технологій волоконної оптики для розроблення стандартів ІКТ і аналіз особливостей діяльності інженерного комітету Асоціації телекомунікаційної індустрії щодо телекомунікаційних стандартів та їх взаємозв'язку.

Завдання дослідження: проаналізувати літературу з використанням стандартів інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі кабельних систем; дослідити ключові принципи роботи Консорціуму технологій волоконної оптики у процесі розроблення стандартів; визначити особливості діяльності інженерного комітету Асоціації телекомунікаційної індустрії в контексті впровадження телекомунікаційних стандартів; проаналізувати чинні міжнародні стандарти для проєктування, прокладання, установлення та технічного обслуговування оптоволоконних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Деякі з досліджень наближені до діяльності КТВО, але вони можуть розрізнятися характером своєї діяльності у сфері дослідження ІКТ та стандартизації. Наприклад, у роботі [4] автори взяли за основу національний симпозиум з оптичних волокон та їх застосування, в якому тематичні питання стосуються більше оптичних і фотонних матеріалів, класичних (традиційних) технологій, спеціалізованих і структурних фотонних оптичних волокон, фізики поширення світла в оптичних волокнах тощо.

Водночас безліч організацій, що працюють з оптоволоконними технологіями у сфері стандартизації ІКТ, охоплюють низку важливих інституцій, які здійснюють значний внесок для розвитку цієї галузі [1, 3, 5]. Такі організації не лише розробляють інновації в технології оптоволоконного зв'язку, але й встановлюють стандарти,

що визначають інфраструктуру глобальних телекомунікацій. До таких організацій належать:

- Міжнародний союз електрозв'язку (ITU), що є ключовою організацією в стандартизації ІКТ і телекомунікацій, у межах якої функціонує сектор ITU-T, що розробляє стандарти для телекомунікаційних мереж, зокрема оптоволоконних [6, 7];

- Європейський інститут стандартів телекомунікацій (ETSI), що є європейською організацією, яка активно працює над стандартизацією телекомунікаційних технологій, зокрема оптоволоконних мереж [7];

- Інститут інженерів електротехніки та електроніки (IEEE), що через свій підрозділ Комунікаційне товариство і IEEE 802 розробляє ключові стандарти для оптоволоконних мереж, де необхідно визначати архітектуру та протоколи передачі даних крізь оптичні волокна [7, 8];

- Міжнародна організація зі стандартизації (ISO), яка разом з Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), зокрема через свій технічний комітет ISO/IEC JTC 1, займаються стандартизацією ІКТ, де оптоволоконні технології є важливим аспектом стандартизації в межах підкомітету SC 25, зосередженого на інтерфейсах і компонентах для мультимедійних систем і телекомунікацій [9, 10];

- Американський національний інститут стандартів (ANSI), який координує розроблення національних стандартів для США, зокрема стандарти для оптоволоконних технологій. За допомогою підрозділів, таких як Асоціація телекомунікаційної індустрії (TIA), ANSI підтримує розроблення стандартів для оптичних волокон і телекомунікаційних систем, що використовують оптичне волокно для передачі даних [11].

Тому основні зусилля цих організацій у сфері стандартизації можуть сприяти широкомасштабному впровадженню оптоволоконних технологій у глобальні телекомунікаційні мережі, але виникає необхідність дослідити взаємозв'язок організацій з окремими підрозділами, зокрема розглянути можливість забезпечення сумісності систем для оптоволоконних мереж ІКТ.

Методи та матеріали

У дослідженні впроваджувалися такі методи: аналітичний із системним аналізом (вивчення наявних

міжнародних стандартів кабельних систем з аналізом взаємодії цих стандартів); порівняльний аналіз (порівняння типів багатомодового волокна відповідно до міжнародних стандартів, а також міжнародних стандартів з ДСТУ). На основі літературного огляду схарактеризовано діяльність КТВО та співпрацю КТВО з Асоціацією телекомунікаційної індустрії (TIA), де досліджуються чинні міжнародні стандарти, що містить компетентність кабельних систем та оптоволоконних мереж. Тому для цього необхідно виконати такі дії: провести опис із наданням характеристик КТВО (основні відомості, які містять загальні елементи, ключові напрями діяльності та функції); проаналізувати співпрацю КТВО з TIA на основі використання чинних телекомунікаційних стандартів; визначити об'єкт дослідження, що об'єднуватиме КТВО з TIA для збору даних.

Основні відомості та характеристика Консорціуму технологій волоконної оптики

Щоб краще зрозуміти діяльність КТВО у сфері стандартизації для ІКТ, розглянемо декілька аспектів, пов'язаних із загальними елементами КТВО (рис. 1), основними напрямками та функціями (табл. 1). Елементи є критично важливими для забезпечення високої якості, надійності та ефективності оптоволоконних технологій у сучасних ІКТ. До загальної сукупності елементів належать КТВО: учасники (компанії, наукові установи, державні органи, інвестори), цілі (розроблення нових технологій, створення сучасних продуктів, упровадження нових технологій та стандартизацій), сфери діяльності (дослідження та розроблення, виробництво, послуги тощо), координація (керівний орган, робочі групи, секретаріат), фінансування (внески учасників, державне фінансування та приватні інвестиції). Загальні елементи КТВО у сфері стандартизації для ІКТ зображені на рис. 1.

На основі узагальненої схеми елементів КТВО для ІКТ розглянемо основні напрями діяльності Консорціуму у сфері стандартів ІКТ [2, 3].

1. Розроблення стандартів для оптоволоконних систем зв'язку, де КТВО бере активну участь у створенні нових технологій для оптичних кабелів, з'єднувачів, передавальних систем і приймачів, що дають змогу передавати великі обсяги інформації на значні відстані з мінімальними втратами.



Рис. 1. Загальні елементи КТВО у сфері стандартизації для ІКТ

Таблиця 1. Узагальнена характеристика функцій КТВО для ІКТ

Функції	Характеристика
Розроблення стандартів	КТВО розробляє національні стандарти для телекомунікацій та інформаційних технологій, що передбачає визначення технічних вимог до обладнання, протоколів зв'язку, програмного забезпечення та мережної інфраструктури.
Гармонізація національних стандартів із міжнародними	КТВО забезпечує відповідність національних стандартів міжнародним нормам і рекомендаціям, співпрацюючи з організаціями, такими як ITU, ISO, ETSI, що сприяє інтеграції України у світову ІКТ-екосистему.
Контроль якості та сертифікація обладнання	КТВО проводить процедури сертифікації телекомунікаційного та інформаційного обладнання для забезпечення його відповідності стандартам якості, безпеки та надійності, що передбачає сертифікацію апаратних і програмних рішень.
Регулювання частотного спектра	КТВО відповідає за розподіл і регулювання використання частотного спектра для різних видів телекомунікаційних послуг, зокрема мобільного зв'язку, радіозв'язку й супутникових систем.
Підтримка інновацій у сфері ІКТ	КТВО сприяє впровадженню нових технологій, таких як 5G, Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення та штучний інтелект, завдяки розробленню відповідних стандартів і рекомендацій.
Технічна освіта та обізнаність	КТВО проводить семінари, конференції та освітні програми для інформування про найновіші досягнення в галузі оптоволоконних технологій, а також для підтримки професійного розвитку фахівців.
Забезпечення інтероперабельності	КТВО забезпечує сумісність різних видів телекомунікаційних систем і обладнання, що дає змогу ефективно інтегрувати їх у єдину національну та міжнародну інфраструктуру.
Захист споживачів	Організація контролює надання якісних послуг у сфері телекомунікацій та ІКТ, зокрема забезпечення доступу до інтернету, телефонного зв'язку та захист прав користувачів на якісні послуги зв'язку.

2. Стандартизація компонентів, де встановлення та впровадження єдиних стандартів для різних компонентів оптичних мереж (наприклад, кабелі,

з'єднувачі, розподільчі коробки тощо) допомагає уникнути несумісності та забезпечує спрощення процесу інтеграції систем різних виробників.

3. Підвищення ефективності передачі даних, де консорціум сприяє розвитку стандартів, що дає змогу збільшити швидкість та ефективність передачі інформації за допомогою оптоволоконних технологій. Це важливо для підтримки сучасних високошвидкісних мереж і сервісів, таких як 5G та майбутні стандарти зв'язку.

4. Безпека мереж, де КТВО також розробляє рекомендації та стандарти для забезпечення кібербезпеки в оптоволоконних мережах, що ставить перед собою основне завдання в контексті зростання атак на інфраструктуру ІКТ.

5. Екологічні стандарти та охорона навколишнього середовища, де консорціум зосереджує увагу на сталому розвитку та мінімізації впливу на довкілля, розробляючи стандарти для екологічно безпечних матеріалів і процесів виробництва.

На основі загальних елементів КТВО розглянемо узагальнену характеристику функцій для ІКТ. У табл. 1 подано характеристику функцій та діяльність у межах компетентності консорціуму (наприклад, розроблення національних стандартів та їх відповідність до міжнародних вимог або проведення процедур сертифікації обладнання ІКТ, а також упровадження нових технологій). Наведено вісім основних функцій, що в межах компетентності консорціуму встановлюють ключові вимоги щодо об'єднання фахівців, компаній та організацій у комплексну галузь оптоволоконних технологій для розроблення та впровадження нових стандартів і технологій в ІКТ.

Співпраця Консорціуму технологій волоконної оптики з Асоціацією телекомунікаційної індустрії

КТВО тісно співпрацює з Асоціацією телекомунікаційної індустрії (*Telecommunication Industry Association*, скорочено ТІА) для розроблення та підтримки сімейства стандартів, що регулюють проєктування, встановлення та експлуатацію оптичних систем у телекомунікаційній та інформаційно-комунікаційній інфраструктурі [3, 5, 12]. Інженерний комітет ТІА розробляє та підтримує добровільні стандарти телекомунікаційної кабельної інфраструктури для приміщень, що належать користувачам, таких як комерційні будівлі, житлові будинки, медичні та освітні установи, центри оброблення даних та промислові будівлі. Загальні топології збалансованої

витої пари, оптичного волокна та широкосмугового коаксіального кабелю, проєктування, монтаж, відстані підтримки застосунків та конфігурації розеток розглядаються в загальних стандартах. Стандарти, що містять компоненти, детально описують вимоги до кабелів, роз'ємів та кабельних збірок, а окремі стандарти ТІА можуть стосуватися специфікацій для лабораторних і польових випробувань, інтелектуального проєктування будівель, адміністрування шляхів і просторів, що забезпечується за допомогою прокладання кабелів, а також телекомунікаційного заземлення та з'єднання [1, 7, 12].

На рис. 2 показано схему з ієрархією телекомунікаційних стандартів ТІА та їх безпосередній взаємозв'язок, де зеленим кольором показано загальні топології збалансованої витої пари, оптичного волокна та іншого, синім позначено стандарти телекомунікаційної кабельної інфраструктури для приміщень, а червоним кольором – стандарти, що містять компоненти з описанням вимог до кабелів, роз'ємів та кабельних збірок [3, 13].

Далі стисло розглянемо деякі ключові елементи сімейства стандартів ТІА, які підтримуються КТВО. У табл. 2 подано характеристику застосування кожного стандарту [14–16].

Результати досліджень

Проведемо порівняльний аналіз декількох галузевих міжнародних стандартів КТВО, що регулюють проєктування, прокладання, встановлення та технічне обслуговування оптоволоконних мереж. Для цього спочатку проаналізуємо окремо кожен серію міжнародних стандартів ISO/IEC 11801, IEC 60793, TIA-568; TIA/EIA 492AAAx та ITU-T [7, 10, 14–16].

ISO/IEC 11801: Глобальний стандарт для структурованих кабельних систем і оптоволокон. Цей міжнародний стандарт визначає вимоги до кабельних систем загального користування для підтримки широкого спектра телекомунікаційних послуг у будівлях та між будівлями, а сфера застосування поширюється на проєктування та розгортання структурованих кабельних систем у таких середовищах, як офіси, центри оброблення даних, промислові об'єкти тощо. Основні аспекти стандарту охоплюють:

- топологію (описує структуру кабельної системи, зокрема горизонтальні та магістральні кабелі, точки доступу та інші компоненти);

– категорії кабелів (визначає категорії кабелів, наприклад клас оптоволоконних з'єднань: OM1 багатомодове волокно, серцевина 62,5 мкм, мінімальна смуга пропускання 200 МГц км на довжині хвилі 850 нм; OM2 багатомодове волокно, серцевина якого становить 50 мкм з мінімальною модальною смугою пропускання 500 МГц км та довжиною хвилі 850 нм; OM3 багатомодове волокно, серцевина якого становить 50 мкм з мінімальною модальною смугою пропускання 2000 МГц км та довжиною хвилі 850 нм; OM4 багатомодове волокно, серцевина якого

становить 50 мкм з мінімальною модальною смугою пропускання 4700 МГц км та довжиною хвилі 850 нм);

– типи середовищ передачі (може охоплювати мідні кабелі та волоконно-оптичні кабелі з відповідними вимогами до продуктивності для кожного типу);

– особливості застосування (підтримка різних типів телекомунікаційних послуг, наприклад голосовий зв'язок, передача даних, відеоконференції та інші цифрові сервіси).

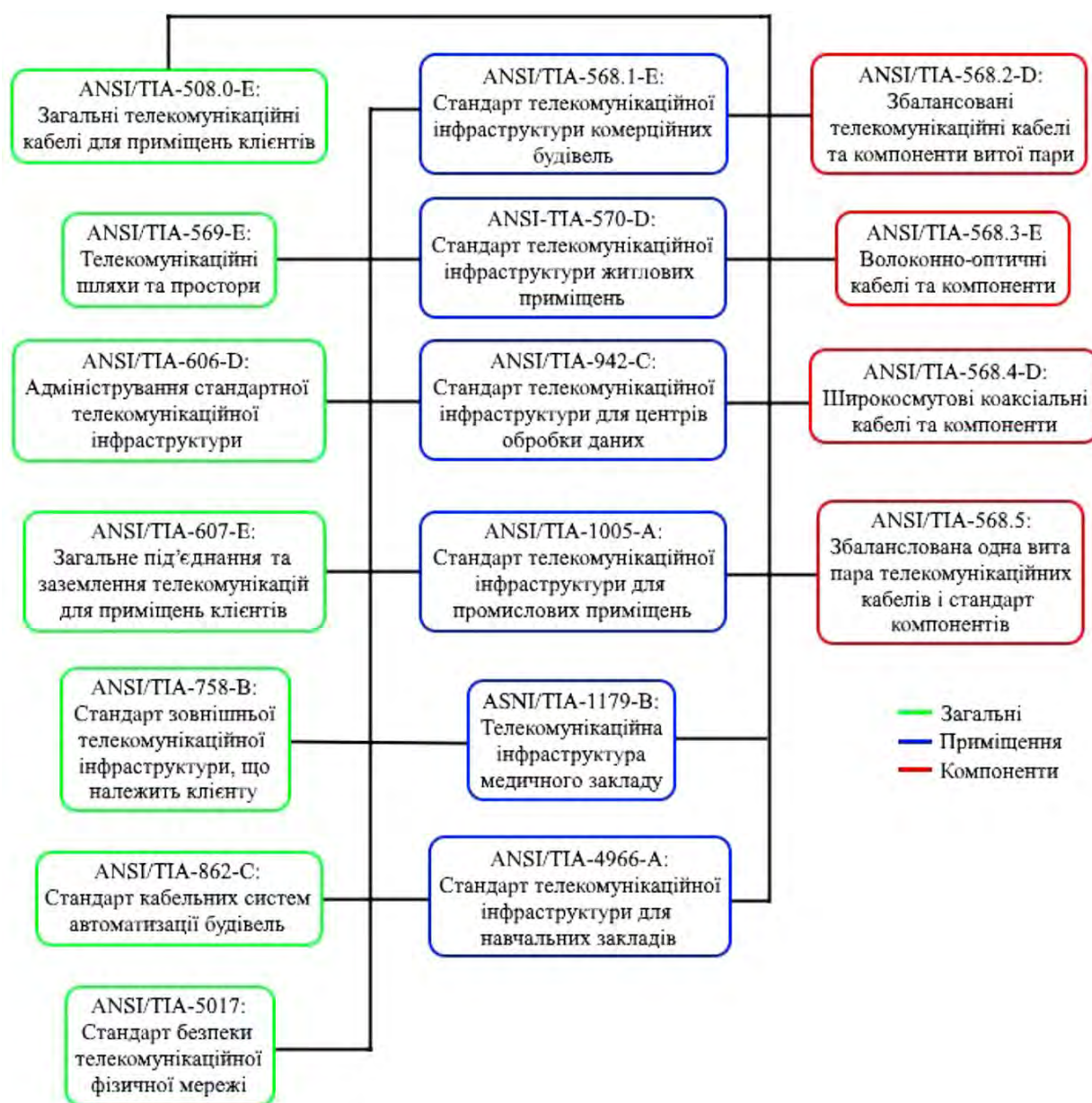


Рис. 2. Схема з ієрархією телекомунікаційних стандартів TIA та їх взаємозв'язок

Таблиця 2. Характеристика елементів сімейства стандартів ТІА в поєднанні з КТВО

Стандарт	Характеристика стандарту
ANSI/TIA-568 Стандарт структурування кабелю для комерційних будівель	Один з найпоширеніших стандартів у ІКТ, що охоплює специфікації для оптичних кабелів, з'єднувачів та практик встановлення для забезпечення високопродуктивних мереж. КТВО сприяє постійному оновленню розділів цього стандарту, що стосується оптоволоконних технологій, зокрема для покращення швидкості передачі можливостей дальності та забезпечення зворотної сумісності.
ANSI/TIA-492 Специфікації для оптичного волокна	Це сімейство стандартів надає специфікації для різних типів оптичних волокон, зокрема багатомодових і одномодових, і використовується в телекомунікаційних системах. Зазначені стандарти визначають такі характеристики, як затухання, пропускна здатність та механічні властивості. КТВО допомагає забезпечити відповідність типів волокон сучасним і майбутнім вимогам до високошвидкісної передачі даних, підтримуючи розгортання передових мереж, таких як 5G та інших.
ANSI/TIA-606 Стандарт адміністрування телекомунікаційної інфраструктури	Цей стандарт встановлює керівні принципи для маркування, ідентифікації та адміністрування оптичних компонентів у телекомунікаційній інфраструктурі, що полегшує ефективне управління оптичними мережами, спрощує процеси усунення несправності та перешкод, оновлення та обслуговування. КТВО надає рекомендації щодо найкращих практик документування та організації оптичних мереж, забезпечуючи ефективну роботу та масштабованість інформаційно-комунікаційної інфраструктури.
ANSI/TIA-758 Стандарт телекомунікаційної інфраструктури зовнішніх об'єктів, що належать замовнику	Стандарт, який надає рекомендації щодо встановлення та обслуговування оптичних систем поза будівлями, наприклад, оптоволоконні мережі між корпусами, дата-центрами та зовнішніми об'єктами. КТВО забезпечує формування стандартів для зовнішніх оптичних систем, зосереджуючись на питаннях довговічності в умовах навколишнього середовища, техніках встановлення та забезпечення продуктивності на великій відстані для високошвидкісних мереж.
ANSI/TIA-942 Стандарти для дата-центрів	Стандарт, який визначає вимоги щодо проєктування та встановлення інфраструктури дата-центрів, зокрема для кабельних систем, які використовують оптоволоконно. Цей стандарт забезпечує, щоб дата-центри могли обробляти високошвидкісну передачу даних із низькою затримкою. КТВО працює над рекомендаціями щодо оптоволоконного прокладання кабелю в дата-центрах для оптимізації продуктивності, зменшення втрат сигналу та підтримки майбутніх розширень.
ANSI/TIA-455 Методи випробувань для оптичних волокон	Серія стандартів, що окреслює методи тестування оптичних компонентів і систем для забезпечення стабільної та надійної роботи оптоволоконних технологій у різних середовищах і застосунках. КТВО сприяє визначенню процедур тестування для забезпечення цілісності, якості та довговічності оптоволоконних кабелів та з'єднувачів, таким чином підтримуючи надійність мереж.

IEC 60793. Серія міжнародних стандартів, розроблених Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), які визначають вимоги до оптичних волокон, що використовуються в телекомунікаціях і системах передачі інформації. Ці стандарти охоплюють як фізичні, так і передавальні характеристики оптичних волокон. Розглянемо основні частини серії стандарту IEC 60793:

- IEC 60793-1 (визначає методи випробування оптичних волокон, зокрема ті, що стосуються оптичних, геометричних та механічних властивостей);
- IEC 60793-2 (установлює технічні характеристики продукції для різних типів оптичних волокон, зокрема багатомодові та одномодові, що застосовуються для передачі даних);
- IEC 60793-3 (надає рекомендації щодо класифікації волокон за різними вимогами, специфічними для застосувань).

IEC 60793-2 містить класифікацію та типи волокон. До класифікації волокон належать такі: одномодові волокна, що використовуються для

передачі інформації на значні відстані з високою швидкістю, наприклад у магістральних мережах; багатомодові волокна, які застосовуються для передачі даних на коротші відстані, наприклад у локальних мережах. До основних типів волокон належать: ICE 60793-2-10 (містить характеристики багатомодових волокон із градієнтним профілем, наприклад OM2, OM3, OM4); ICE 60793-2-50 (описує одномодові волокна, зокрема G.652 та G.655, що застосовуються для передачі даних на довгі дистанції).

TIA-568. Серія телекомунікаційних стандартів, що розроблені Американською асоціацією індустрії зв'язку (TIA) та встановлюють вимоги щодо структурованих кабельних систем, використовуваних для передачі інформації, голосу та відео в комерційних будівлях. Основні частини стандарту TIA-568 містять такі складники:

- TIA-568.0 (загальні вимоги до структурованих кабельних систем, що охоплює основні компоненти, такі як кабелі, роз'єми, точки доступу та кабельні траси);

– TIA-568.1 (телекомунікаційні кабельні системи для комерційних будівель, що визначає вимоги до встановлення, тестування та підтримки кабельних систем для таких середовищ);

– TIA-568.2 (стандарт для мідних кабельних систем, що містить специфікації для мідних кабелів категорій 3, 5у, 6, 6А 8, які підтримують різні швидкості передачі даних);

– TIA-568.3 (стандарт для волоконно-оптичних кабельних систем, що охоплює вимоги до оптоволоконних кабелів, роз'ємів та іншого оптичного обладнання);

– TIA-568.4 (стандарт для кабельних систем житлових будівель, що забезпечує рекомендації для телекомунікаційних рішень у житлових приміщеннях).

TIA/EIA 492AAAx. Серія специфікацій, що розроблені спільно TIA та EIA (*Electronic Industries Alliance*) і стосуються волоконно-оптичних кабелів. Стандарт 492AAAx визначає вимоги до різних типів одномодових та багатомодових оптичних волокон, що використовуються в телекомунікаціях і для передачі даних. Основні положення стандартів серії TIA/EIA 492AAAx мають такі складники:

– 492AAAA (специфікація, що містить вимоги до багатомодових волокон, які використовуються на коротших дистанціях у локальних мережах);

– 492AAAB (специфікація, що визначає характеристики одномодових волокон, що використовуються для довгих дистанцій та високошвидкісної передачі інформації);

– оптичні параметри, де стандарти охоплюють вимоги до коефіцієнта заломлення, затухання, діаметра ядра та оболонки волокна, а також інші параметри, що впливають на продуктивність волокна;

– механічні параметри, що містять вимоги міцності, стійкості до розтягування, впливу температури й навколишнього середовища;

– категорії волокон, де серія стандартів 492AAAx розширюється з новими категоріями та модифікаціями для покращення продуктивності, що відповідає розвитку ІКТ.

ITU-T (Міжнародний союз електров'язку – Сектор стандартизації електров'язку). Цей сектор відповідальний за розроблення глобальних стандартів у сфері телекомунікацій та ІКТ. Він забезпечує стандартизацію, що дає змогу взаємодіяти між телекомунікаційними системи в глобальному

масштабі, забезпечуючи сумісність, надійність та продуктивність мереж і обладнання.

Основні функції ITU-T:

– розроблення стандартів, де ITU-T створює технічні стандарти "Рекомендації", які охоплюють широкий спектр телекомунікаційних технологій, зокрема передачу даних, мережі, сигналізацію, інтерфейси, а також технології для доступу до інтернету;

– глобальна гармонізація, де стандарти ITU-T спрямовані на забезпечення глобальної сумісності між різними телекомунікаційними мережами й технологіями, такими як телефонія, інтернет, мобільні мережі та оптоволоконні системи, що дає змогу різним країнам і операторам використовувати єдині стандарти для обміну інформацією та голосовими послугами;

– основні робочі групи ITU-T, що розробляють рекомендації в конкретних напрямках, зокрема оптичні системи (SG15), сигналізація (SG11), передача даних (SG13), кібербезпека (SG17), інтернет-протоколи тощо.

Ключові стандарти ITU-T охоплюють таке: G-серія (оптичні волокна та передача даних, наприклад G.652, G.655 для оптичних волокон); H-серія (мультимедіа для стиснення відео та аудіо, таких як H.264 для відео, H.323 для IP-телефонії); X-серія (протоколи передачі даних, що містять протоколи для передачі інформації, безпеки та кібербезпеки, наприклад X.509 для цифрових сертифікатів); Y-серія (мережні технології, наприклад Y.1731 для управління й моніторингу служб передачі даних). Сектор ITU-T відповідає за стандартизацію телекомунікацій.

ITU-T G.651.1 – стандарт, що описує характеристики багатомодових оптичних волокон із градієнтним профілем показника заломлення. Волокна цього типу зазвичай використовуються для передачі даних на короткі та середні відстані, наприклад у локальних мережах і дата-центрах. Основні характеристики ITU-T G.651.1:

– тип волокна для багатомодових оптичних волокон із градієнтним профілем показника заломлення, оптимізованих для роботи в діапазоні довжин хвиль 850 нм і 1300 нм;

– категорії багатомодових волокон, що передбачає специфікації для різних категорій багатомодових волокон, наприклад: OM2 підтримує швидкості передачі до 10 Гбіт/с на відстані до 550 м;

ОМ3 оптимізоване для роботи на 850 нм з підтримкою швидкостей до 10 Гбіт/с і 40 Гбіт/с; ОМ4 підтримує швидкості до 100 Гбіт/с на коротких дистанціях;

- довжина хвиль: 850 нм є оптимальним діапазоном для багатомодових волокон, що використовується в більшості сучасних систем для передачі даних на короткі дистанції; 1300 нм застосовується в деяких системах передачі для подовження дальності зв'язку;

- характеристики волокна, які мають більший діаметр ядра (50 мк або 62,5 мк) порівняно з одномодовими волокнами; це дає змогу одночасно передавати кілька мод світла, що робить їх менш чутливими до джерел світла та зручними для використання в середовищах із менш суворими вимогами до точності передачі;

- застосування волокна стандарту G.651.1 зазвичай в дата-центрах, корпоративних мережах, інституціях, де важлива висока швидкість передачі даних на відносно короткі відстані, що підходить для технологій, зокрема *Ethernet*, *Fiber Channel*, і для застосування на високих швидкостях (40/100 Гбіт/с).

Далі проаналізуємо деякі українські стандарти, що можуть відповідати описаним вище міжнародним стандартам для застосування ІКТ в Україні. Серед основних стандартів розглянемо такі: ДСТУ ISO/IEC 11801-1:2018 Інформаційні технології. Кабельні системи загального призначення для приміщень користувачів. Частина 1. Загальні вимоги; ДСТУ IEC 60793-1-1:2001 Волокна оптичні. Частина 1-1. Загальні технічні умови. Основні положення; ДСТУ EN IEC 60793-1-34:2022 Оптичні волокна. Частина 1-34. Методи вимірювання та процедури випробувань. Скрученість волокна.

ДСТУ ISO/IEC 11801-1:2018. Стандарт ідентичний міжнародному ISO/IEC 11801-1:2017, що встановлює вимоги до проектування, інсталяції та роботи кабельних систем загального призначення для приміщень користувачів. Основні положення застосування стандарту: а) для кабельних систем, які використовуються в будівлях і на територіях, зокрема офіси, житлові та громадські будівлі; б) обслуговування комунікаційних мереж, що забезпечують передачу даних [17].

ДСТУ IEC 60793-1-1:2001 та ДСТУ EN IEC 60793-1-34:2022. Стандарти, що стосуються оптичних волокон і встановлення вимог до їх характеристик і тестування. Стандарт ДСТУ IEC 60793-1-1:2001

оснований на міжнародному стандарті IEC 60793-1-1 і стосується загальних вимог до оптичних волокон. Основне завдання стандарту – описати базові характеристики оптичних волокон та їх загальні параметри [18]. Стандарт ДСТУ EN IEC 60793-1-34:2022 є частиною оновленої серії, що також ґрунтується на міжнародних стандартах IEC і описує специфічні вимоги до методів тестування механічних властивостей оптичних волокон [19].

На основі проаналізованих джерел і стандартів порівняємо можливості типів багатомодових волокон для кожного стандарту, що показано в табл. 3 [20]. ОМ1 і ОМ2 – оригінальні типи діаметром 62.5 і 50 мк відповідно – вважаються застарілими в стандартах ISO/IEC 11801 і TIA 568, тому вони більше не додані в основний текст документів. Однак вони дозволені як старі типи волокон і можуть упроваджуватися для розширення застарілих мереж. Нові параметри мають використовувати типи багатомодового волокна ОМ3, ОМ4 або ОМ5.

Багатомодове ОМ3 є першим волокном, розробленим для використання з лазерними джерелами світла на 850 нм, здебільшого для підтримки роботи 1 Гбіт/с і 10 Гбіт/с. ОМ4 пропонує більшу довжину з'єднання, підтримуючи роботу 10 Гбіт/с до 400 м у стандарті та до 550 м за деякими інженерними правилами.

Традиційно багатомодове волокно працювало на одній довжині хвилі, а коли були потрібні вищі швидкості мережі, розробили лазери, що працюють на цих швидкостях. Такий підхід дуже добре працював до 10 Гбіт/с, а пізніше – до 25 Гбіт/с. Однак для подальшого збільшення швидкості були додані паралельні оптоволоконні системи, спочатку для 40 Гбіт/с, потім для 100 Гбіт/с. Чотири волокна, або смуги, використовувалися для підтримки цих високошвидкісних з'єднань.

Інноваційним є впровадження ОМ5, відомого як "широкосмугове" багатомодове волокно, що є першим багатомодовим волокном, розробленим для підтримки кількох довжин хвиль. Він забезпечує дуплексну передачу 100 Гбіт/с з використанням двох або чотирьох довжин хвиль від 850 до 950 нм. Це робиться з огляду на переваги багатомодового волокна, якому властива більша довжина хвилі передачі. Менша хроматична дисперсія волокна на більших довжинах хвиль означає, що вимоги до модальної смуги пропускання можуть бути послаблені на цих довгих хвилях.

Таблиця 3. Порівняння типів багатомодового волокна згідно з міжнародними стандартами на основі КТВО

Тип волокна	Галузеві (міжнародні) стандарти					Типове максимальне загасання (дБ/км)		Смуга пропускання МГц-км			
	ISO/IEC 11801-1	IEC 60793-2-10	TIA-568.3-D	TIA/EIA 492AAAх різновид	ITU-T	850 нм	1300 нм	Переповнений запуск		Ефективна модальна смуга пропускання	
62.5	OM1	A1b	TIA 492AAAA (OM1)	492AAAA	–	3.5	500	200	500	–	–
50/125	OM2	A1a.1b	TIA 492AAAB (OM2)	492AAAA	G.551.1	3.5	500	500	500	–	–
50/125	OM3	A1a.2b	TIA 492AAAC (OM3)	492AAAA	–	3.0	500	1500	500	2000	–
59/125	OM4	A1a.3b	TIA 492AAAD (OM4)	492AAAA	–	3.0	500	3500	500	4700	–
50/125	OM5	A1a.4b	TIA 492AAAE (OM5)	492AAAA	–	3.0	500	3500	500	4700	2470

Висновки

Дослідження підтверджує важливість діяльності Консорціуму технологій волоконної оптики в партнерстві з Асоціацією телекомунікаційної індустрії для розроблення нових технологій і стандартів. Визначено ключові елементи діяльності консорціуму, зокрема функціональні тести, стандартизація компонентів і контроль якості, що сприяють підвищенню ефективності оптоволоконних систем. Розглянута ієрархія телекомунікаційних стандартів TIA дає змогу краще зрозуміти взаємозв'язок між різними стандартами та їх вплив на розвиток технологій.

Порівняння міжнародних стандартів (ISO/IEC 11801, IEC 60793, TIA-568, TIA/EIA 492 AAAx, ITU-T) підтверджує їх відповідність для проєктування, прокладання та обслуговування оптоволоконних мереж. Результати свідчать про необхідність подальшого вдосконалення стандартів для забезпечення надійності та безпеки телекомунікаційних послуг.

Аналіз українських стандартів, що відповідають міжнародним вимогам для застосування інформаційно-

комунікаційних технологій (ІКТ) в Україні, демонструє важливість їх упровадження для розвитку національної інфраструктури. Тому ці стандарти є важливими для інтеграції нашої країни в глобальний інформаційний простір, забезпечують відповідність національної телекомунікаційної інфраструктури міжнародним вимогам, що сприяє покращенню якості надання послуг, підвищенню надійності мереж і майбутньому зростанню в секторі ІКТ.

Досягнуті результати дають змогу краще зрозуміти механізми гармонізації стандартів на глобальному рівні та їх вплив на розвиток телекомунікаційних систем, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності використання цих стандартів у сучасних умовах. Вектором подальших досліджень буде аналіз міжнародних стандартів ІКТ в поєднанні з новітніми технологіями, такими як 5G, штучний інтелект та Інтернет речей, з метою визначення впливу на розвиток або заміну наявних стандартів у сфері волоконно-оптичних технологій.

Список літератури

1. Yang T. ICT technologies standards and protocols for active distribution network. *Smart power distribution systems. Academic Press*, 2019. P. 205–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812154-2.00010-9>
2. Reid R. Fiber cabling fundamentals, installation, and maintenance. *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center* (2021). P. 291–321. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119597537.ch17>
3. Goldsmith E. FOTC Standards Explorer. *TIA's Fiber Optics Tech Consortium*, 2024. URL: <https://www.tiafotc.org/standards/fotc-standards-explorer/>
4. Romaniuk R. S., Wójcik W., Smolarz A. Development of optical fiber technology in Poland–2018. *Optical Fibers and Their Applications* 2018. SPIE, 2019. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10177-010-0012-5>
5. Konyshov V.A. et al. Trends of and Prospects for the Development of Fiber-Optic Communication Systems. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2023. Vol. 50. №. Suppl 4. P. 435–S450. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335623160078>
6. Ferrari A. et al. Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G. 652. D fiber transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*. 2020. Vol. 38. №. 16. P. 4279–4291. URL: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-38-16-4279>

7. Luo Y., Effenberger F. What is beyond 50G: future standards of optical access networks // *Journal of Optical Communications and Networking*. 2024. Vol. 16. №. 7. P. 106–112. DOI: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-16-7-C106>
8. Valerie M. IEEE 802.3 Single-mode Optical Fiber Ethernet Standards. TIA's Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafoc.org/ieee-802-3-ethernet-standards-update/singlemode-standards-update/>
9. Bertine H., Faynberg I., Lu H. L. Overview of data and telecommunications security standardization efforts in ISO, IEC, ITU, and IETF. *Bell Labs Technical Journal*. 2004. Vol. 8. №. 4. P. 203–229. DOI: <https://doi.org/10.1002/bltj.10096>
10. Elliot B. J. Designing a Structured Cabling System to ISO 11801. CRC Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315214696>
11. Jew A. Data Center Telecommunications Cabling and TIA Standards. *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*. 2021. P. 193–210. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119597537.ch12>
12. Krohn D. A. Fiber optic sensor consortium activities: Opportunities and barriers. *Proc. of SPIE Vol.* Vol. 5589. 2004. P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.582567>
13. Valerie M. TIA Family of Standards. TIA's Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafoc.org/tia-standards-update/>
14. Dorosz, J., & Romaniuk, R. S. Development of optical fiber technology in Poland: 2014. *Optical Fibers and Their Applications 2014*. Vol. 9228. SPIE, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2047303>
15. Jew A. Data Center Telecommunications Cabling. *Data Center Handbook* (2014). P. 257–264.
16. Woodward B. *Cabling: the complete guide to copper and fiber-optic networking*. John Wiley & Sons, 2014.
17. ДСТУ ISO/IEC 11801-1:2018 Інформаційні технології. Кабельні системи загальної призначеності для приміщень користувачів. Частина 1. Загальні вимоги (ISO/IEC 11801-1:2017/Cor 1:2018, IDT). Поправка № 1:2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80533
18. ДСТУ IEC 60793-1-1-2001 Волокна оптичні. Частина 1-1. Загальні технічні умови. Основні положення (IEC 60793-1-1:1999, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78358
19. ДСТУ EN IEC 60793-1-34:2022 Оптичні волокна. Частина 1-34. Методи вимірювання та процедури випробувань. Скрученість волокна (EN IEC 60793-1-34:2021, IDT; IEC 60793-1-34:2021, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=108299
20. Optical Fiber Types. TIA's Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafoc.org/optical-fiber-types/>

References

1. Yang, T. (2019), "ICT technologies standards and protocols for active distribution network", *Smart power distribution systems*. Academic Press. P. 205–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812154-2.00010-9>
2. Reid, R. (2021), "Fiber cabling fundamentals, installation, and maintenance", *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*. P. 291–321. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119597537.ch17>
3. Goldsmith, E. (2024), "FOTC Standards Explorer". TIA's Fiber Optics Tech Consortium. URL: <https://www.tiafoc.org/standards/fotc-standards-explorer/>
4. Romaniuk, R. S., Wójcik, W., Smolarz, A. (2018), "Development of optical fiber technology in Poland–2018", *Optical Fibers and Their Applications*. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10177-010-0012-5>
5. Konyshv, V. A. et al. (2023), "Trends of and Prospects for the Development of Fiber-Optic Communication Systems", *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. Vol. 50. №. Suppl 4. P. 435–S450. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068335623160078>
6. Ferrari, A. et al. (2020), "Assessment on the achievable throughput of multi-band ITU-T G. 652. D fiber transmission systems", *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 38. №. 16. P. 4279–4291. URL: <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-38-16-4279>
7. Luo, Y., Effenberger, F. (2024), "What is beyond 50G: future standards of optical access networks", *Journal of Optical Communications and Networking*. Vol. 16. №. 7. P. 106–C112. DOI: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-16-7-C106>
8. Valerie, M. (2024), "IEEE 802.3 Single-mode Optical Fiber Ethernet Standards. TIA's Fiber Optics Tech Consortium". URL: <https://www.tiafoc.org/ieee-802-3-ethernet-standards-update/singlemode-standards-update/>
9. Bertine, H., Faynberg, I., Lu, H. L. (2004), "Overview of data and telecommunications security standardization efforts in ISO, IEC, ITU, and IETF", *Bell Labs Technical Journal*. Vol. 8. №. 4. P. 203–229. DOI: <https://doi.org/10.1002/bltj.10096>
10. Elliot, B. J. (2018), "Designing a Structured Cabling System to ISO 11801", *CRC Press*. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315214696>
11. Jew, A. (2021), "Data Center Telecommunications Cabling and TIA Standards", *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*. P. 193–210. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119597537.ch12>
12. Krohn D. A. "Fiber optic sensor consortium activities: Opportunities and barriers." *Proc. of SPIE Vol.* Vol. 5589. 2004. P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.582567>
13. Valerie, M. (2024), "TIA Family of Standards", *TIA's Fiber Optics Tech Consortium*. URL: <https://www.tiafoc.org/tia-standards-update/>
14. Dorosz, J., & Romaniuk, R. S. (2014), "Development of optical fiber technology in Poland". *Optical Fibers and Their Applications*. Vol. 9228. SPIE, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2047303>
15. Jew, A. (2014), "Data Center Telecommunications Cabling". *Data Center Handbook*. P. 257–264.
16. Woodward, B. (2014), "Cabling: the complete guide to copper and fiber-optic networking". *John Wiley & Sons*.
17. DSTU ISO/IEC 11801-1:2018 Informatsiini tekhnolohii. Kabelni systemy zahalnoi pryznachenosti dlia prymyshchen korystuvachiv. Chastyna 1. Zahalni vymohy (ISO/IEC 11801-1:2017/Cor 1:2018, IDT). Popravka № 1:2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80533
18. DSTU IES 60793-1-1-2001 Volokna optychni. Chastyna 1-1. Zahalni tekhnichni umovy. Osnovni polozhennia (IEC 60793-1-1:1999, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78358

19. DSTU EN IEC 60793-1-34:2022 Optychni volokna. Chastyna 1-34. Metody vymiruvannia ta protsedury vyprobuvan. Skruchenist volokna (EN IEC 60793-1-34:2021, IDT; IEC 60793-1-34:2021, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=108299
20. Optical Fiber Types. TIA's Fiber Optics Tech Consortium, 2024. URL: <https://www.tiafotc.org/optical-fiber-types/>

Надійшла (Received) 10.01.24

Відомості про авторів / About the Authors

Мадінов Микола Леонідович – Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, Київ, Україна; e-mail: nmadinov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5910-8774>

Руденко Наталія Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, завідувач кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій, інструктор академії Cisco, Київ, Україна; e-mail: sully170517@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8582-3126>

Madinov Mykola – State University of Information and Communication Technologies, Postgraduate Student at the Department of Mobile and Video Information Technologies, Kyiv, Ukraine.

Rudenko Nataliia – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Head of Department of Mobile and Video Information Technologies, Cisco Academy Instructor, Kyiv, Ukraine.

STANDARDS AS A BASIS FOR INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

The **subject matter** of the article is study of aspects of the activity of the consortium of fiber optics technologies and the engineering committee of the telecommunications industry association using current international standards of information and communication technologies. The **goal** of the work is to investigate the principles of operation of the consortium of fiber optics technologies for the development of ICT standards and the peculiarities of the activities of the engineering committee of the telecommunications industry association regarding telecommunication standards and their relationship. The following **tasks** were solved in the article: to conduct a review of the literature using the standards of information and telecommunication technologies based on cable systems; study the basic principles of the work of the consortium of fiber-optical technologies in the process of developing standards; determine the peculiarities of the activities of the engineering committee of the association of the telecommunications industry in the context of the implementation of telecommunication standards; analyze existing international standards for the design, installation, installation and maintenance of fiber optic systems. Methods: analytical method with systematic analysis (study of existing international standards of cable systems with analysis of the interaction of these standards) and comparative analysis (comparison of types of multimode fiber according to international standards, as well as comparison of international standards with DSTU standards); **Results**: the results of the study provide a comparative analysis of international standards that provide the design, laying, installation and maintenance of fiber optic networks. On the basis of ISO/IEC 11801, IEC 60793, TIA-568, TIA/EIA 492 AAx and ITU-T standards, comparative possibilities of types of multimode fibers for each of the standards were carried out. **Conclusions**: The study confirms the importance of the fiber optics technology consortium in partnership with the telecommunications industry association to develop new technologies and standards. Based on the analysis of Ukrainian standards that meet international requirements for the use of information and communication technologies in Ukraine, the need for their implementation for the development of national infrastructure was clarified, since these standards are important for the integration of Ukraine into the global information space, ensuring compliance of the national telecommunication infrastructure with international requirements, which will improve the quality of service provision, improve network reliability and support future growth in the information and communication technology sector. **Practical benefits**: improvement of development processes, implementation based on the use of international (TIA) and Ukrainian (DSTU) standards of information and communication technologies. **Scientific novelty**: a comprehensive study of the relationship between standardization processes and practical aspects of the design and maintenance of fiber optic networks was conducted.

Keywords: association; multimode fiber; information technology; consortium; standard.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мадінов М. Л., Руденко Н. В. Стандарти як основа інформаційно-комунікаційних технологій: дослідження міжнародних стандартів комунікаційних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 153–164. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.153>

Madinov, M., Rudenko, N. (2024), "Standards as a basis for information and communication technologies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 153–164. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.153>

L. SMIDOVYCH, Y. KULYK, M. MOMOT

TELECOMMUNICATION OPERATOR'S TRANSITION TO THE OMNICHANNEL ARCHITECTURE

The subject matter of the article is the omnichannel architecture of information systems of telecom operators, functional requirements for it and the processes of transformation from multichannel to omnichannel architecture. **The goal** is to elaborate the reference architecture of telecommunication operator's omnichannel platform, and to transform the existing information architecture according to the principles of omnichannel approach and open digital architecture, what will improve customer experience, increase telecommunication operator's competitiveness and customer loyalty. The following **tasks** were solved at the study: analysis of the current state of information systems in telecommunications; analysis of marketing and technical drivers for transition from multichannel to omnichannel architecture, analysis of specifics of omnichannel approach implementation in telecommunications and related challenges, analysis of functional and system requirements for telecommunication operator's omnichannel platform, elaboration of the reference omnichannel architecture, elaboration of a recommendations for the process of transformation from the existing multichannel architecture of the communication operator to the target omnichannel architecture. To solve these problems, **methods** of system and business analysis were used, in particular, methods of analysis of software requirements, technologies for developing software application architecture. The following **results** were obtained. The current state of the telecommunications services industry in part of customer engagement, and related approaches – the multichannel and the omnichannel one – were analysed. The functional and non-functional requirements to omnichannel implementation were considered. Reference functional and component architecture of omnichannel customer engagement function was proposed. Strategies of transition to modern omnichannel architecture were considered and analysed. **Conclusions:** implementation of omnichannel approach in telecommunications and transition to omnichannel architecture require transformation of CSP's informational architecture itself. It should be performed according to principles of Open Digital Architecture (ODA), and developed in frames functional blocks of ODA. Such a transformation will ensure improving of customer experience, increasing customer satisfaction and customer loyalty, allow CSPs to increase competitiveness by reduce operating costs, improving operational efficiency, and overall business performance.

Ключові слова: omnichannel; customer experience; telecommunications; open architecture; architecture transformation.

Introduction

The telecommunications sector is currently undergoing a process of digital transformation, which includes changes in technologies, IT architecture and business models. One of the aspects of such transformation is the transition from traditional multichannel approach to interaction with customers to an omnichannel one.

Multichannel approach refers to a business using multiple channels to interact with customers, such as email, web, phone, social media, and in-person interactions. Each channel is managed separately, with its own business logic, processes, IT systems, and goals. Customers can choose which channel they prefer to use to interact with the communications service provider (CSP), but there may be little or no coordination and consistency between channels. This can result in a fragmented customer experience (CX).

Omnichannel approach refers to a strategy for providing a seamless and integrated customer experience

across multiple communication channels. The goal of omnichannel approach is to enable customers to interact with a CSP through their preferred channel, switch channels while ensuring a consistent and personalized experience across all channels.

The principal drivers of transition to omnichannel approach are the customer expectations from one hand, and CSPs needs to stay competitive in a rapidly evolving market by process optimization, operating costs reducing and customer data analysis. Customer-centric approach is one of the key strategies to improve customer experience and customer engagement, and increase loyalty of subscribers.

The advent of digital technology has fundamentally changed the way customers interact with telecommunications service providers. Traditionally CSPs provide telco-based channels like SMS/USSD, IVR, web-based such as web portals, mobile applications, social media platforms, messengers, email, and physical channels like points-of-sell (POS), physical stores and service centres, self-service kiosks and so on. Currently most of

customers have digital experience and require mobile accessibility [1], and prefer use digital channels instead of physical one.

Only 15% of customers with mobile service issues and 30% customers with fixed network service-related issues turned to "client services" those provided directly by the operator's staff [2]. But customers who want face-to-face answers or the opportunity to touch and test devices need a seamless CX in physical stores [3]. Today, customers expect to use a variety of digital touchpoints. Thus, omnichannel approach affects telcos' customer engagement activities at every stage of the customer life cycle [4].

Recent research shows that customer's needs for personalization, proactive engagement and transparency in communications, and delivering a seamless experience for both potential customers and sales and marketing employees – as they need to deliver an optimal customer service – became one of the key internal drivers to adopt omnichannel capabilities [5, 6].

Analysis of recent research and publications

Both multichannel and omnichannel approaches are based on usage of several customer channels [7, 8]. Channels or customer touchpoints are often defined as a customer contact point through which a business interacts with their customers. Currently CSPs use different kinds of channels. These are traditional for telecommunication providers phone based channels like SMS/USSD, IVR, and call centres; web-based channels like web-portals, mobile applications, messengers and chatbots, and social media.

Off line channels like points-of-sale and retailer shops are still used by part of CSP's customers. But call centre operators, sellers in shop or support engineers use some kind of assistant application, what in common case can be assumed and managed as special kind of digital channel.

In-bound channels are used by customer to investigate products, purchase and manage services, query support from CSP. Out-bound channels are used by CSP for customer notification, marketing activities such as promotional campaigns and call-back services.

Multichannel approach has a number of drawbacks and limitations [7, 8]:

1. Isolated channels – different channels are independent and implement different sets of scenarios. The same workflow (i.e. purchase of some product, service management) may have different implementations on the different channels.

2. Multiple points of configuration – different channels are managed and administrated by different departments using separate tools.

3. Some platforms (i.e. different value-added service (VAS) platforms, Marketing Systems, CMS) implements separate virtual channels – isolated set of scenarios and workflows implemented on some physical channel, which is shared with other systems. For example – separate IVR menus on different short numbers to manage core telecommunication services and value-added services (VAS).

4. Customer journey usually is implemented in frames of some channel. Hopping between channels in scope of one customer journey is impossible or restricted, context of communication is lost. The results are customer disappointing and unsatisfactory, lost on information and lost of time to restore the context of communication.

The result is the multichannel landscape has multidimensional silos making it impossible to create shared business rules and configuration for all channels [8].

According to [9] two main dimensions of customer journey integration are perceived consistency and perceived connectivity of touchpoints. Consistency means receiving the same information as well as experience, and performance across channels. Connectivity means finding no barriers when moving from one channel to another. So, implementation of consistent and seamless customer journey (fig. 1) and interaction with customers and partners is the key point to improve customer experience.

Currently, the telecommunications sector worldwide is at the stage of changing technologies and business models, which has been called digital transformation. It is based on technological innovations such as digital network architecture – IMS and a software-defined network (SDN), development of 4G/5G and IoT/IoE technologies and services, BSS/OSS transition to a cloud-native microservice based component architecture, and the emergence of new business models (including OTT, B2B2x/B2G2x) [11].

Digital transformation is the technological driver and enabler of transition to omnichannel architecture at the same time. As the result of digital transformation, new architectural models, standards and approaches are developed and implemented. It includes recent initiatives of the TM Forum related to the development of standards for Open Digital Architecture (ODA) [12] and open API (Open API), as part of it. New approaches to system and data integration is one of fundamental enablers of omnichannel transformation [13].

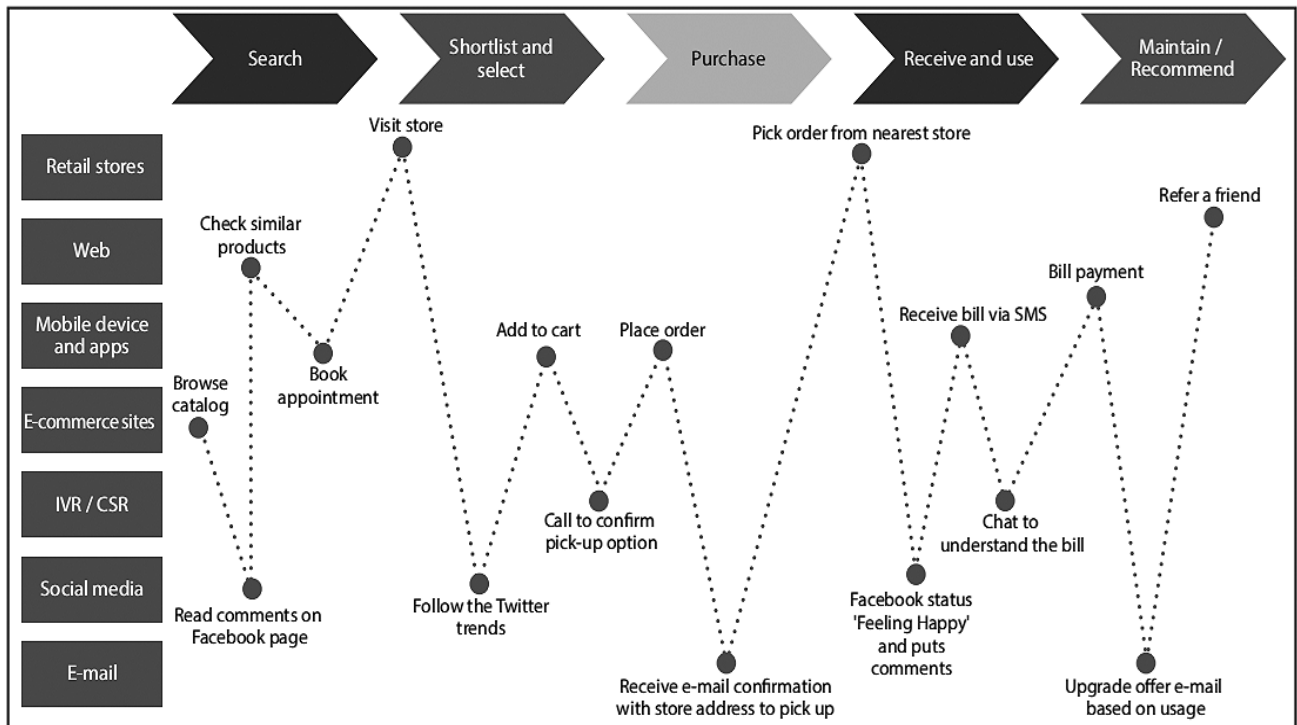


Fig. 1. Customer journey in omnichannel environment [10]

Progress in machine learning, AI and data analytic is making it easier for CSPs to improve CX, provide automation of customer requests processing, and analyse customer data. Most of CSPs see the high potential of AI/ML using in customer experience / customer relationship management in such applications as chatbots and personal digital assistant implementation, customer interaction and social media analysis, customer engagement and lead generation [14].

Implementing an omnichannel approach in the telecommunication industry can be complex and comes with the set of challenges. Some key technological complexities and problems associated with implementing an omnichannel approach in telecommunications are described below [11, 15].

Architecture and integration of Systems: telecom companies often have complex and diverse IT infrastructure for customer relationship management, billing, order processing, and other functions. Integrating these systems to provide a seamless omnichannel experience can be challenging and may require significant investments in technology and resources.

Many CSPs, especially the "old" one, have legacy systems that were developed independently for specific functions and services. Integrating these legacy systems with modern omnichannel solutions can be complex due to differences in technology, data formats, and

communication protocols. Managing a large number of channels, data sources and inventories of various types is one of the key technical challenges. In many cases legacy systems and environments are too difficult to adjust to an omnichannel strategy, and they are not designed to accumulate and integrate customer data across all touch points.

Data Management: telecom operators deal with vast amounts of customer data distributed between different systems and storages. Ensuring the accuracy, consistency, and security of this data across all channels is crucial for providing a unified customer experience. Data silos and inconsistencies can lead to misunderstandings and frustration for customers.

Channel Consistency: maintaining a consistent experience across various channels is essential. Historically, as part of multichannel approach, different channels were designed and developed independently. Some channels have technological limitations related with channel nature. Differences in service quality, information, or processes between channels can lead to customer dissatisfaction.

Customer Security and Privacy: the telecommunication industry handles sensitive customer and commercial information. Ensuring the security and privacy of customer data across all channels, implementing robust cyber security measures, and complying with data

protection laws is a critical concern and may be a challenge in omnichannel approach implementation.

Currently, there are a number of omnichannel platforms, frameworks and solutions on the market, both universal and telecom-oriented [16]. Some of these systems are rather omnichannel CRM, which supports only marketing and purchase processes. Use of out-of-the-box omnichannel platform may be a good solution for a green field operator, but comprehensive implementation of omnichannel approach on existing CSP's information infrastructure requires transformation of information infrastructure itself.

Task of the study. Thus, it can be concluded that the implementation of the omnichannel approach in telecommunications is associated with challenges related to both organisational transformation and information architecture transformation. In particular, information systems in the field of telecommunications, first of all BSS/OSS, do not meet modern technological and business requirements, and its transformation to modern IT architecture is required [11].

Actual are the following tasks: analysis of the current state of information systems in telecommunications, analysis of marketing and technical drivers for transition from multichannel to omnichannel architecture, analysis of specifics of implementation of the omnichannel approach in telecommunications, and the requirements for the omnichannel platform as part of informational ecosystem of communication operator, development of it reference architecture and recommendations for the process of transforming from multichannel architecture to omnichannel one, that would allow the implementation of omnichannel approach to improve customer experience and increase loyalty of subscribers.

The **purpose of this article** is to analyse high-level functional and system requirements for omnichannel platform in the field of telecommunications, to elaborate requirements for the architecture of such systems and to provide reference architecture of telecommunication operator's omnichannel platform and recommendations for the process of transformation of the existing information architecture of telecom operators according to the principles of omnichannel approach and open digital architecture, what will improve customer experience, increase telecommunication operator's competitiveness and customer loyalty.

Materials and methods used in the study are system and business analysis [17, 18], methods of analysis of software requirements, etc.

Study results

Implementation of omnichannel strategies for service providers, including telecommunication service providers, has notable specific in comparison with common businesses such as retail [15]. Some key distinctions are described below.

The channels for communication service providers may include on-line platforms, mobile applications, physical stores or branches, customer service centres, and self-service portals. Interaction channels may vary based on the nature of the service and channel specific. But communication strategies for CSP prioritize digital experience and mobile accessibility. This results in the channels for telco providers are online-first and mobile-first. This may involve developing user-friendly mobile applications and responsive websites to cater to customers who prefer interacting through their mobile devices.

Telecom service providers offer intangible services rather than physical products. Fulfilment for CSPs usually involve delivering intangible services, such as activating a subscription, providing network connectivity, and ensuring the smooth provision of communication services. The customer journey revolves around services, and customer engagement spans a longer duration, as services are subscription-based and require ongoing relationships. The focus of customer interaction is on maintaining a consistent and positive experience over time, including customer support, troubleshooting and relationship management. This means that omnichannel approach should be applied during all customer's life-cycle and should be implemented on many information systems, not only sales and marketing one.

Billing and subscription management, customer service, and customer support are integral components of service provider's processes. Omnichannel strategies in this context involve ensuring a seamless billing experience, providing transparent information, and managing subscription changes. Providing of customer service is a critical component of omnichannel strategies for service providers. This includes offering consistent and efficient customer support across various channels.

CSPs should leverage real-time data sharing across channels to provide up-to-date information to customers. Whether it's real-time inventory availability or order status, customers expect accurate and timely information. Consistent and timely information about customer, services, products should be available for all channels – so called 360-degree customer view.

Telecom providers operate in regulated industry, which adds an extra layer of complexity and some restrictions regarding compliance with industry regulations and data protection laws.

CSP omnichannel requirements analysis. Hi level requirements for omnichannel strategy implementation can be formulated as follows: it must provide a seamless and integrated customer experience across multiple channels and platforms during whole customer's lifecycle.

Analysis of customer expectations, technological and business specificity of the field of telecommunications, which were discussed above, allows to formulate the following functional and non-functional requirements for omnichannel implementation in the field of telecommunications:

1. Support all phases of customer's lifecycle, not only product discovery and purchase, but also service management, troubleshooting and customer support.

2. Provide unified user experience between different channels. It includes functional capabilities, common business logic and work flows, and customer information sharing between channels. In other hand, nature, specifics, and limitations of different channels should be taken into account.

3. Provide smart seamless channel hopping. Customer can start interaction (customer journey), such as product ordering, service management, troubleshooting on one channel, switch to another channel, and later finish it via third channel. Context should be preserved from the start till the end of interaction. Omnichannel engine should recognize the context, provide necessary data and instructions to channel to continue the interaction.

4. Single source of customer data – so called 360-degree customer view. All channels should receive unified, consistent, and actual information about customer, products, and services.

5. Provide interaction automation, predictive analysis and dynamic recommendations for customer. The last one includes Next Best Action (NBA) and Next Best Offer (NBO) [19]. NBA calculated according to last customer activity and interaction context, NBO – according to customers' needs and preferences.

6. Centralized configuration, process and change management across all channels. This requires real-time data analysis and artificial intelligence.

7. Common contact and notification policy enforcement over all channels. This includes possibility

of customer to manage preferable channel(s), time and scope of notification provided by CSP.

8. Provide storage of contact history for needs of statistics and analytic, powered with AI/ML capabilities [19, 20], as well as historical data archiving and retention.

9. Provide comprehensive monitoring of interactions, customer satisfaction, reporting and KPIs – so called helicopter view.

10. Implement security policies, in particular related with storage and management of commercial and personal data.

Also non-functional requirements, such as redundancy and high availability, are important, including the following:

1. No single point of failure. Inaccessibility of some channel, or component of omnichannel engine/platform should not lead to incapability of customer engagement functionality itself.

2. Channels itself are independent one from each other. Channels should be capable to provide basic interaction logic in autonomous mode, in case of failure or inaccessibility of omnichannel engine.

3. In case of failure of some channel, omnichannel engine should switch active interactions to most suitable active channel.

Functional architecture of omnichannel platform.

In order omnichannel platform to meet the mentioned above requirements, it should contain the following functional components [10, 21, 22, 23, 24]:

1. Channels are separate customer-faced layer of CSP's informational infrastructure. Inbound channels are used by customers and subscribers to initiate contact or interact with CSP, outbound channels are used by Operator for subscriber notification. Channels implement basic channel logic and can operate in stand-alone mode. Unified channel logic is provided by underlying omnichannel platform. Important part of channel functionality is subscriber identification, and authentication and authorization (AA).

2. Omnichannel engine implements unified customer journey scenarios and business logic, and notification policies. It analyses interactions, perform scoring, and recognize customer intentions and customer journey. Actualization of NBO and provisioning of NBA are the part of this functionality. One of the main functions of omnichannel engine is keeping operative customer data up-to-date, according to its validity period. Customer service data periodically updated from BSS/OSS, customer interaction data – from channels.

3. Omnichannel orchestrator implements cross-channel customer journey, provides seamless integration of channels and channel hopping, share customer journey context between channels. Part of this functionality is provisioning of relevant NBO/NBA for customer to active channel.

4. 360-degree customer view provides comprehensive information about subscriber from internal profile storage and from external systems

5. Notification engine implement outbound interactions, such as marketing campaigns, subscriber notifications and alerts.

6. Configuration component implements centralized storage and management of data, related with customer interaction rules and policies, work flows and processes configuration.

7. Management interfaces (UI, API). Operator-faced interface provide possibility to manage and configure interaction scenarios, notification policies and rules, generate reports and statistics. Subscribers use corresponding interfaces to manage preferences related to interaction (preferred channels and language, block notifications, and so on).

8. Operative subscriber profile storage. It stores data required for operative decision making and interaction scenarios implementation: key customer attributes from BSS/OSS, customer preferences related to communication with Operator, and context of in-progress customer interaction(s). The sources of operative customer data

are BSS/OSS (such as CMS, Billing System, Product Catalogue, Inventory and other). Channels provides interaction context, that includes active scenario, key customer decision points and current termination point of scenario. Operative storage should work in on-line mode and provides cashing capabilities for real-time access.

9. Customer data history storage operates in off-line mode, stores comprehensive information about customer activities over channels during retention period, enriched with historical data from BSS/OSS, and provides data for customer interaction and behaviour analysis.

10. AI/ML empowered decision & prediction subsystem uses historical data for analysis, provides personalized recommendations for subscribers, supports chatbots operation [19, 20].

11. OAM function provides statistics and omnichannel platform monitoring, calculates metrics and KPIs, including Net Promoter Score (NPS) and Life Time Value (LTV).

Omnichannel platform component architecture implements functional architecture within the framework of the CSP's information infrastructure. It's proposed to implement it according to modern ODA and Open API standards and approaches [12, 13, 25]. According to ODA reference functional architecture (fig. 2), omnichannel platform is a part of the Engagement Management and Party management functions.

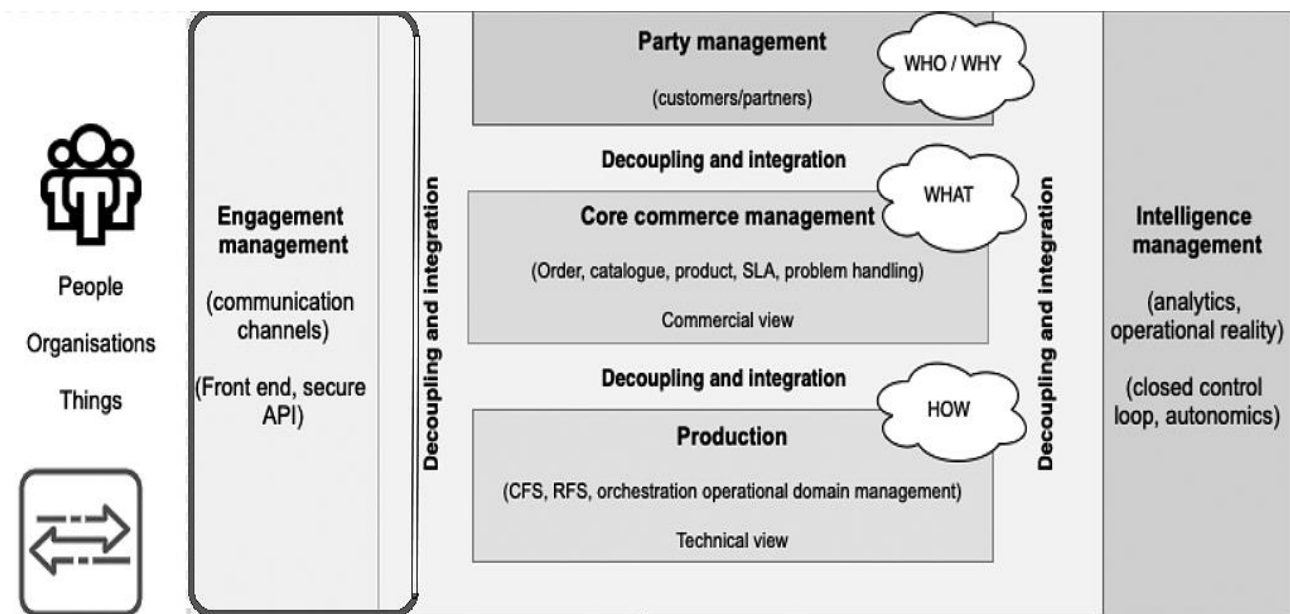


Fig. 2. ODA functional blocks grouping based on [13]

According to [13] the Engagement Management functional block focuses on the interaction with all internal and external actors, which can be people or software agents, customers, employees, partners, third parties, etc. This interaction can be implemented via multiple communication channels. The Engagement Management functional block is a presentation layer only; it does not store any processes, functions or operational data, only implements technical functions needed to provide the right communication context to the user. This functional block is responsible for the front end functionality, authentication and authorisation of users, and management of the user-interaction journeys, including content personalisation and filtering. The important functionality that needs to be provided is the omnichannel experience. The interactions can include providing information or activating processes and functions that are implemented by components from other functional layers using the corresponding APIs. Another important function of this functional block is the so-called API HUB that is responsible for exposing a standardised set of APIs to the partners or other external systems.

The Party Management functional block manages the internal and external actors, such as persons or organisations

(referred to as Parties). It focuses on management of the information related to the parties, the party roles and rights, and all related marketing, sales and billing activities.

Proposed omnichannel reference component architecture is shown below (fig. 3), and includes functional components, described in the previous section. Omnichannel platform components interacts with and use functionality provided by other components of CSP's information infrastructure, such as following:

1. Integration layer includes Open API and Event Hub. Open API provides access to functionality and data exposed by all functional blocks, including underlying BSS/OSS components. Event bus aggregates customer related events from BSS/OSS, and push relevant events to omnichannel engine.

2. Security layer includes such components as Single sign-on (SSO), Personal data management (PDM), subscriber Identity management (IDM) and other security functions. It provides unified security capabilities for all functional blocks.

3. AI/ML functionality can be implemented as part of omnichannel platform, or provided by Core and Production layers. For example, campaign management function may provide NBO for customers.

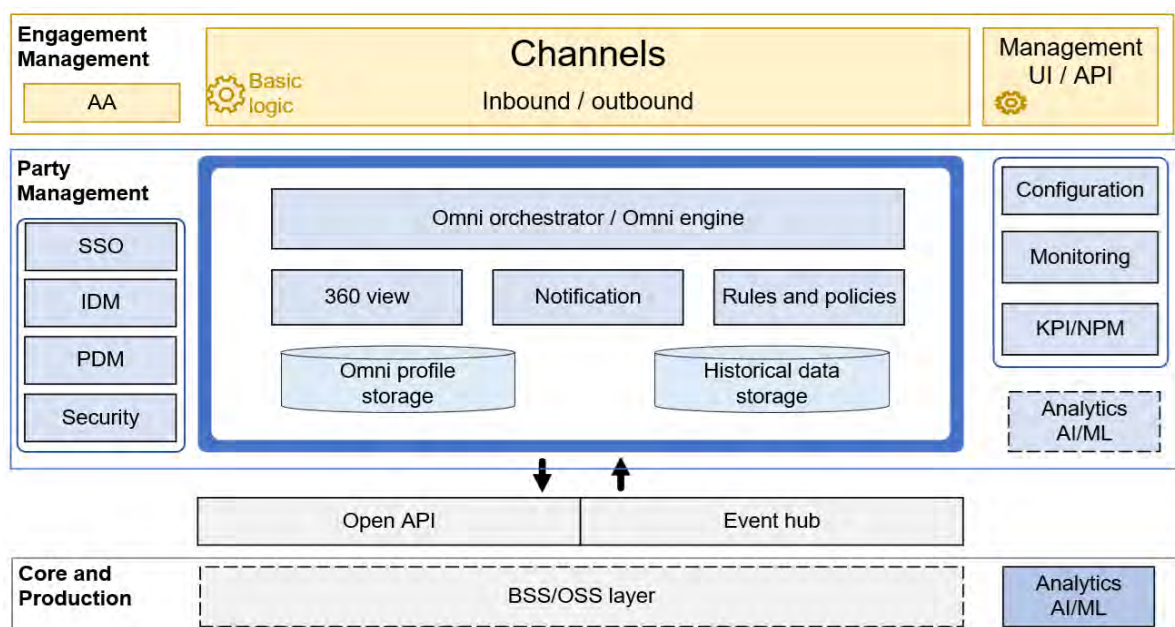


Fig. 3. Omnichannel Platform reference component architecture

According to ODA Agile Lifecycle, migration architecture is used as intermediate during CSP digital transformation and transition to open architecture. In frames of such an approach, and transformation strategies described in [26], technical implementation

of omnichannel strategy can be provided in several ways:

1. greenfield – parallel deployment of a new omnichannel platform, built on the declared principles, and gradual transfer of existing channels to new platform.

For example, first, digital channels like web portals and mobile applications are transferred to the new omnichannel infrastructure, then a traditional telco-based channels like SMS/USSD and IVR, then call-centre, and so on. Thus, at the transition stage, there are two customer engagement platforms – the old and the new one – between which channels and processes are distributed;

2. carve-out – gradual deployment of new omnichannel platform components and transition of separate processes related to customer engagement functionality to omnichannel platform. As processes are migrated, unused legacy components and systems are sequentially decommissioned so its functionality are transferred to new components of omnichannel platform. For example, first, marketing processes are transferred, then retail sales, service management processes and so on. It should be understood that existing legacy systems can have monolithic architecture and/or legacy interfaces, and decoupling of customer engagement functionality may require its modernization from their developers and vendors;

3. brownfield – gradual replacement of individual legacy systems, related to customer engagement, with new systems implemented omnichannel approach. For example, first, CRM is replaced, then systems of interaction with partners, subscriber support and so on. The legacy system, all functions of which have moved to the new infrastructure, is decommissioned.

Each of the mentioned above approaches has its own specifics, advantages and disadvantages. The migration strategy should be chosen depending the existing information architecture, customer engagement processes, the available project budget, etc. For large CSP, the parallel deployment of the new omnichannel infrastructure in full requires significant resources, budget and time until the first results will be received.

Therefore, a combined (brownfield and/or curve-out) strategy is usually used for gradually transition to a new omnichannel architecture.

It should be understood that technical implementation on omnichannel approach is a part of digital transformation of CSP. The recommendations on process of transformation of the information architecture of telecom operators on the basis of an intermediate architecture built on the basis of the open standardized Open API TMF was proposed in [11]. A necessary condition for transition to omnichannel architecture is at least migration architecture (in terms of ODA Agile Lifecycle) is implemented and integration layer provides access to the functionality and data of existing systems. This should ensure a gradual transition to the target omnichannel architecture.

Conclusions

The implementation of omnichannel approach in telecommunications and transition to omnichannel architecture require transformation of CSP's informational architecture itself. The reference functional architecture of omnichannel platform is proposed. It was elaborated according to principles of ODA, and developed in frames of the Engagement management and the Party management functions of ODA. Recommendations for the process of transformation of the existing information architecture of telecommunications operators to omnichannel architecture was provided. Transformation to omnichannel architecture should ensure improving of customer experience, increasing customer satisfaction and customer loyalty, allow CSPs to increase competitiveness by improving operational efficiency, and overall business performance.

References

1. Zippia (2023), "40 Fascinating Mobile App Industry Statistics [2023]: The Success Of Mobile Apps In The U.S.", available at: <https://www.zippia.com/advice/mobile-app-industry-statistics/> (last accessed 15.02.2024).
2. TMForum (2023), "Omnichannel challenges: can telcos enhance the customer service experience?", available at: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/ebooks/omnichannel-challenges-can-telcos-enhance-the-customer-service-experience> (last accessed 15.02.2024).
3. Zippia (2023), "25+ Useful User Experience Statistics [2023]: What Is The Value Of UX?", available at: <https://www.zippia.com/advice/user-experience-statistics/> (last accessed 15.02.2024).
4. Forrester (2017), "Make Omnichannel A Cornerstone Of Your Digital Transformation", available at: <https://www.forrester.com/report/Make+Omnichannel+A+Cornerstone+Of+Your+Telecom+Digital+Transformation/-/E-RES137332> (last accessed 15.02.2024).

5. Gereaa, C., Herskovic, V. (2022), "Transitioning from Multichannel to Omnichannel Customer Experience in Service-Based Companies: Challenges and Coping Strategies", *Journal of theoretical and applied electronic commerce research*. 2022, No. 17(2), P. 394-413. DOI: <https://doi.org/10.3390/jtaer17020021>
6. Gereaa, C., Gonzalez-Lopez, F., Herskovic, V. (2021), "Omnichannel Customer Experience and Management: An Integrative Review and Research Agenda", *Sustainability*, No. 13(5), 2824. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su13052824>
7. Reis, J., Amorim M., Melao, N. (2018), "Omni-Channel Service Architectures in a Technology-Based Business Network: An Empirical Insight", 9th International Conference, IESS 2018, Karlsruhe, Germany, September 19–21, 2018, Proceedings. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00713-3_3
8. AsiaInfo (2015), "Quantifying the value of Omni-channel CRM for Telecoms", available at: <https://www.tmforum.org/resources/whitepapers/quantifying-the-value-of-omnichannel-crm-for-telecoms/> (last accessed 15.02.2024).
9. Gasparin I. et al. Isadora Gasparin, Ekaterina Panina, Larissa Becker, Mika Yrjölä, Elina Jaakkola, Cristiane Pizzutti (2022), "Challenging the "integration imperative": A customer perspective on omnichannel journeys", *Journal of Retailing and Consumer Services*, Vol. 64, 2022, 102829 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102829>
10. Infosys (2018), "Realizing the Omni-channel Strategy for Telecommunication Companies", available at: <https://www.infosys.com/digital/insights/documents/omni-channel-strategy.pdf> (last accessed 15.02.2024).
11. Smidovych, L., Davydovskyi Y. (2022), "Processes of the telecom operator's information architecture transformation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1(19), P. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.047>
12. TMForum (2021), "Open Digital Architecture (ODA)", available at: <https://www.tmforum.org/oda/> (last accessed 15.02.2024).
13. TMForum (2021), "IG1167 ODA Functional Architecture Exploratory Report v6.0.0", available at: <https://www.tmforum.org/resources/standard/ig1167-oda-functional-architecture-exploratory-report-v6-0-0/> (last accessed 15.02.2024).
14. AI TMForum (2023), "Generative AI: Operators take their first steps", available at: <https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/reports/generative-ai-operators-take-their-first-steps> (last accessed 15.02.2024).
15. Sprinkl (2023), "Omnichannel customer engagement: How to manage effectively", available at: <https://www.sprinkl.com/blog/omnichannel-customer-engagement/> (last accessed 15.02.2024).
16. Rock, Shinde P. (2023), "Omnichannel Marketing: A Comprehensive Guide for 2024", available at: <https://rockcontent.com/blog/omnichannel-marketing/> (last accessed 15.02.2024).
17. IIDA (2015), "A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide)", IIBA, P. 512.
18. Wiegers, K. I., Bitti, J. (2013), "Software Requirements (Developer Best Practices) 3rd Edition", Microsoft Press, 672 p.
19. NBA Alexsoft (2020), "Next Best Action Marketing: How to Implement Hyper-personalization with Machine Learning", available at: <https://www.altexsoft.com/blog/next-best-action-marketing-machine-learning/> (last accessed 15.02.2024).
20. Cao, Longbing; Zhu, Chengzhang. (2022). Personalized next-best action recommendation with multi-party interaction learning for automated decision-making" *PLoS ONE*, Vol. 17(1). DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0263010>.
21. Red Hat (2023), "Designing an Omnichannel Customer Experience", available at: <https://www.redhat.com/architect/portfolio/detail/5-designing-an-omnichannel-customer-experience> (last accessed 15.02.2024).
22. Suarez, N., Avila, O. (2019), "Towards an Architecture Framework for the Implementation of Omnichannel Strategies", *Applied Informatics*, Second International Conference, ICAI 2019, Madrid, Spain, November 7–9, 2019, Proceedings (pp. 295–309), DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-32475-9_22.
23. Aspire Systems (2022), "Omni-channel Integration Solution", available at: <https://www.aspiresys.com/enterprise-integration/boomi/omni-channel-solution> (last accessed 15.02.2024).
24. Hodroj, A. (2015), "Patterns of Real-time Omni-channel Architecture: A Distributed In-Memory Computing Approach", available at: <https://medium.com/@ahodroj/patterns-of-real-time-omni-channel-architecture-a-distributed-in-memory-computing-approach-f7c5befd2c45> (last accessed 15.02.2024).
25. TMForum (2021), "GB998 Open Digital Architecture", Concepts & Principles v2.1.0, available at: <https://www.tmforum.org/resources/reference/gb998-open-digital-architecture-oda-concepts-principles-v2-1-0/> (last accessed 15.02.2024).
26. Turkington, I. (2021), "Open Digital Framework, Open Digital Architecture. ITU-T". *Virtual forum on The Role of Standards in Accelerating Digital Transformation for Cities and Communities*, 42 p.

Надійшла (Received) 14.03.24

Відомості про авторів / About the Authors

Смідович Леонід Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних технологій; м. Харків, Україна; e mail: lsonlinels@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6156-9506>

Кулик Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних технологій; м. Харків, Україна; e mail: y.kulyk@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9773-8170>

Момот Мирослав Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри Комп'ютерних наук та інформаційних технологій; м. Харків, Україна; e mail: m.momot@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2580-5908>

Smidovych Leonid – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies; Kharkiv, Ukraine.

Kulyk Yurii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies; Kharkiv, Ukraine.

Momot Myroslav – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies; Kharkiv, Ukraine.

ПЕРЕХІД ОПЕРАТОРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ НА ОМНІКАНАЛЬНУ АРХІТЕКТУРУ

Предметом дослідження є омніканальна архітектура інформаційних систем операторів телекомунікацій, функціональні вимоги до неї та процеси переходу від багатоканальної до омніканальної архітектури. **Мета статті** – розроблення еталонної архітектури омніканальної платформи телекомунікаційного оператора й трансформація наявної інформаційної архітектури відповідно до принципів омніканального підходу та відкритої цифрової архітектури, що покращить клієнтський досвід, підвищить конкурентоспроможність телекомунікаційного оператора та лояльність клієнтів. У роботі передбачено розв'язати такі **завдання**: визначити сучасний стан інформаційних систем у телекомунікаціях; проаналізувати маркетингові й технічні засади переходу від багатоканальної до омніканальної архітектури; виявити особливості реалізації омніканального підходу в телекомунікаціях і пов'язані з цим виклики; вивчити функціональні та системні вимоги до омніканальної платформи оператора телекомунікацій; розробити еталонну омніканальність архітектури; запропонувати рекомендації для процесу трансформації від наявної багатоканальної архітектури оператора зв'язку до цільової омніканальної архітектури. Для розв'язання зазначених завдань упроваджено **методи** системного та бізнес-аналізу, зокрема аналіз вимог до програмного забезпечення, технологія розроблення архітектури програмних застосунків. **Досягнуті результати**. Визначено сучасний стан галузі телекомунікаційних послуг щодо залучення клієнтів та відповідні підходи – багатоканальний та омніканальний. Розглянуто функціональні та нефункціональні вимоги до омніканальної платформи. Запропоновано еталонну функціональну та компонентну архітектуру багатоканальної функції залучення клієнтів. Проаналізовано стратегії переходу до сучасної омніканальної архітектури. **Висновки**. Реалізація омніканального підходу в телекомунікаціях і перехід до омніканальної архітектури потребують трансформації самої інформаційної архітектури оператора телекомунікації. Перехід має виконуватися відповідно до принципів відкритої цифрової архітектури та реалізовуватися в межах функціональних блоків відкритої цифрової архітектури. Така трансформація забезпечить покращення клієнтського досвіду, підвищення задоволеності та лояльності клієнтів, дасть змогу оператору підвищити конкурентоспроможність унаслідок зниження операційних витрат, підвищення операційної ефективності та загальної ефективності бізнесу.

Keywords: information process; functional modeling; data flows; laser scanning; stages of engineering and geodetic surveys; Leica GIS tools.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Смідович Л. С., Кулик Ю. О., Момот М. О. Перехід оператора телекомунікацій на омніканальну архітектуру. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.165>

Smidovych, L., Kulyk, Y., Momot, M. (2024), "Telecommunication operator's transition to the omnichannel architecture", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 165–174. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.165>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Абдулін О. Р.	31
Андрєєв С. М.	39
Бендеберя М. О.	5, 19
Бронніков А. І.	5
Гавриленко С. Ю.	31
Горелик С. І.	39
Даншина С. Ю.	39
Єна М. В.	59
Зінченко О. В.	110
Калашнікова В. І.	67
Коломієць А. І.	19
Кулик Ю. О.	165
Ляшенко О. С.	85
Мадінов М. Л.	153
Макаренко Г. С.	85
Маланчук О. М.	97
Момот М. О.	165
Нечаусов А. С.	39
Пащенко О. С.	85
Прийма А. С.	39
Руденко Н. В.	153
Ситніков Д. Е.	125
Смідович Л. С.	165
Снядовський В. Ю.	142
Стародубцев М. Г.	85
Тригуба А. М.	97
Шантір А. С.	110
Шолудько Р. Я.	97
Шульга О. А.	125
Юрченко О. Д.	19

ALPHABETICAL INDEX

Abdullin Oleksii	31
Andrieiev Sergey	39
Bendeberia Mariia	5, 19
Bronnikov Artem	5
Gavrylenko Svitlana	31
Horelyk Stanislav	39
Danshyna Svitlana	39
Yena Maksym	59
Zinchenko Olha	110
Kalashnikova Vasylysa	67
Kolomiiets Alona	19
Kulyk Yurii	165
Liashenko Oleksii	85
Madinov Mykola	153
Makarenko Hennadii	85
Malanchuk Oksana	97
Momot Myroslav	165
Nechausov Artem	39
Pashchenko Aleksandr	85
Pryima Andrii	39
Rudenko Nataliia	153
Sytnikov Dmytro	125
Smidovych Leonid	165
Sniadovskyi Vladyslav	142
Starodubcev Nikolaj	85
Tryhuba Anatolii	97
Shantyr Anton	110
Sholudko Roksolana	97
Shulha Oleksandr	125
Iurchenko Oleh	19

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

SCIENTIFIC PUBLICATION

**Сучасний стан
наукових досліджень
та технологій
в промисловості**

**Innovative
technologies and
scientific solutions
for industries**

Щоквартальний науковий журнал

Quarterly scientific journal

№ 4 (30), 2024

No. 4 (30), 2024

Відповідальний секретар журналу *І.Г. Перова*
Відповідальний за випуск *А.А. Коваленко*
Відповідальний за ліцензування *В.В. Косенко*
Редактор *Л.В. Кузьміна*
Комп'ютерна верстка *Л.Ю. Свєтайло*

Responsible secretary of journal *I. Perova*
Responsible for release *A. Kovalenko*
Responsible for licensing *V. Kosenko*
Editor *L. Kuzmina*
Computer layout *L. Svietailo*

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 20,46.
Тираж 150 прим.

Format 60×84/8. Conventional printed sheets 20,46.
Edition of 150 copies.

Віддруковано з готових оригінал-макетів
в типографії ФОП Андреев К.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб
та фізичних осіб-підприємців.
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

Printed from ready-made original layouts
in the printing house
of Individual Entrepreneur Andreev K.V.
Unified State Register of Legal Entities
and Individual Entrepreneurs.
Entry No. 24800170000045020 of 30.05.2003.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com

fl. 50, 9, Acad. Bogomolets Str., Kharkiv, 61157,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com