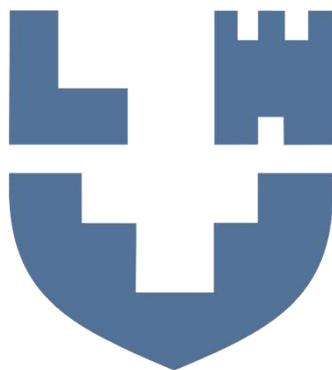


*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ*

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО**

НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ



Головний редактор – професор, д.т.н., Гордєєв О.О.

№58 2025

м. Луцьк

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор:	
професор, д.т.н. Гордєєв О.О.	(м. Луцьк)
Відповідальний секретар:	
доц., к.т.н. Христинець Н.А.	(м. Луцьк)
Члени редакційної колегії:	
проф., д.т.н. Андрущак І.Є.	(м. Луцьк)
проф., д.т.н. Згуровський М.З	(м. Київ)
Affiliate full professor, Avtandil Gagnidze	(Грузія, м. Тбілісі)
д.т.н., доц. Зеленський К.Х.	(м. Київ)
доц., к.т.н. Суринович О.М.	(м. Луцьк)
Affiliate full professor, Iavich Maksim	(Грузія, м. Тбілісі)
проф., д.т.н. Турбал Ю.В.	(м. Рівне)
доц., к.ф.-м.н. Рибицька О.М.	(м. Львів)
PhD. Milosz Marek	(Польща, м. Люблін)
проф., д.т.н. Мельник А.О.	(м. Львів)
проф., д.т.н. Мороз Б.І.	(м. Дніпро)
проф., д.т.н. Тарасенко В.П.	(м. Київ)
проф, PhD. Alison McMillan	(Великобританія, м. Рексем)
проф., д.т.н. Касянчук М.М.	(м. Тернопіль)
проф., д.т.н. Фауре Е.В.	(м. Черкаси)
проф., д.т.н. Олійников Р.В.	(м. Харків)
проф, д.пед.н. Черняшук Н.Л.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Назаревич О.Б.	(м. Тернопіль)
PhD. Karim Elish	(США, м. Лейкленд)
PhD. Zbigniew Omiotek	(Польща, м. Люблін)
PhD. Dagmar Saĝáňová	(Словачина, м. Братишава)
PhD. Paweł Komada	(Польща, м. Люблін)
PhD. José Machado	(Португалія, м. Гімарайш)
проф., д.т.н. Сайко В.Г.	(м. Київ)
доц., к.т.н. Приступа С.О	(м. Луцьк)
PhD. Anna Maria Saniuk	(Польща, м. Зелена Гура)
доц., к.т.н. Ткачук А.А. (заступник головного редактора)	(м.Луцьк)

Адреса редколегії:

Луцький національний технічний університет,
кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки
вул. Львівська 75, ауд.141
м.Луцьк, 43018
тел. (0332) 74-61-15
E-mail: cit@lntu.edu.ua,
сайт журналу: cit.lntu.edu.ua

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО

№58 2025 р.

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення, як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення №40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02456)

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою Луцького національного технічного університету (протокол №9 засідання від 19.03.2025р.)

Рішенням МОН України наказом №515 від 16.05.2016р, журнал включено в перелік наукових фахових видань

Видання індексується у наукометричних та реферативних базах:
Open Academic Journals Index
Academic Resource Index ResearchBib
Rootindexing
Information Matrix for the Analysis of Journals
Ulrichsweb.

ISSN 2524-0560 (Online)

ISSN 2524-0552 (Print)

ЗМІСТ

ІНФОРМАТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА	
Самчук Л.М., Повстяна Ю.С. Автоматизація процесу поселення в гуртожитки з використанням єдиної мови моделювання UML.	5
Примиська С.О., Абрамова А.О., Складанний Д.М. Інтеграція штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів.	12
Савка Я.С., Ковівчак Я.В., Дубук В.І. Розробка автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру.	21
Баутіна М.В. Оцінка надійності та прогнозування відмов заглибних насосів за допомогою передових методів моделювання.	29
Коростін О.О. Оптимізація інтеграції машинного навчання у платформи аналізу текстових потоків у реальному часі: технічні підходи та критерії ефективності.	38
Кравчук Я.Я. Етичні аспекти застосування штучного інтелекту у неприбутковому та благодійному секторах.	46
Буяло О.В., Зайцев О.В. Аналіз можливостей використання цифрових бібліотек в освітньому процесі вищих військових навчальних закладів.	53
Добришин Ю.Є. Класифікація та кодування дефектів програмного забезпечення внаслідок дії кібератак.	59
Козак О.В., Михайлова Л.М., Семенишина І.В. Інструменти моделювання та симуляції для вивчення комп'ютерних мереж: огляд і практичний досвід.	70
Міронов Н.О., Самчук Л.М. Розробка застосунку для взаємодії з комп'ютером за допомогою жестів з використанням технологій ComputerVision.	80
Мороз Б. І., Шишацький О.О. Класифікація видів помилок в геопросторовій базі даних на прикладі державного земельного кадастру.	92
Мосій Л. Є., Сверстюк А. С. Методи моделювання та класифікації електрокардіосигналів.	104
Назарук В.Д., Шайнюк К.С. Модель загроз для інформації системи дистанційного навчання Moodle.	116
Поляковська Н.О. На шляху до практичної рамки LLMOps: розуміння та формування операційної досконалості для великих мовних моделей.	123
Проніна О.І., Синицін Р.В. Розробка AI асистента для локального користувача на мові програмування Python.	131
Шикеринець С.Т., Улічев О.С. Перспективи використання машинного навчання для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативних вимог.	136
Нікітін Д.М., Рибіцький О.М. Інтелектуальні автоматні системи для обробки та аналізу діагностичних даних автомобіля.	143
Приходченко С.Д., Приходченко О.Ю., Шевцова О.С. Програмне порівняння анотацій наукових статей за допомогою статистичних методик обробки природніх мов.	152
П'ятикоп О.Є., Шевченко А.Є. Інтеграція API у вебдодаток для збирання музичних даних з відкритих джерел.	159
Проніна О.І., Рейжевський М.І. Програмування ігрового додатку з використанням штучного інтелекту.	165

Федонюк Ю.А., Глинчук Л.Я. Моніторинг стану здоров'я пацієнтів за допомогою інформаційної технології IoT.	172
Горкуненко А.Б., Сверстюк А.С. Науково-аналітичне дослідження застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації.	181
Марковський О.П., Нікольський С.С. Метод швидкого обчислення експоненти на полях Галуа GF(2 ⁿ) для криптографічних застосувань.	188
УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ	
Васьків Р.І., Веретеннікова Н.В. Методологія «Інженерія хаосу» та стійкість розподілених ІТ-команд.	197
Кунанець Н.Е., Яримович Ю.А. Створення смарт-контрактів у інформаційній системі обліку продажу зброї.	212
Хілуха О.А. Управління корпоративним Starlink проектом.	225

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-01>

UDC 519.816

Samchuk Lyudmila, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

Povstiana Yuliia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0001-5426-4157>

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AUTOMATION OF THE PROCESS OF SETTLEMENT IN DORMITORIES USING THE UNIFIED MODELING LANGUAGE UML

Samchuk L., Povstiana Y. Automation of the process of settlement in dormitories using the unified modeling language UML. This paper considers the computerization of the lodging check-in prepare, especially room reservation. The research's fundamental objective is to create an successful framework that permits robotization and optimizing the forms of settling understudies in a inn, decreasing time and asset costs, and expanding the comfort and fulfillment of clients. The work analyzes the existing frameworks and strategies of booking rooms and uncovers their inadequacies and focal points. Based on this investigation, a modern computerized framework was created, counting a helpful interface for clients and the residence organization, usefulness for booking and saving rooms, bookkeeping for complimentary places, and integration with the understudy database. For creating the framework UML graphs were utilized, counting case charts, action graphs, and grouping graphs, which made a difference to arrange the structure and behavior of the framework in detail. The most comes about of the investigate are the creation of a framework model and testing of its effectiveness in genuine conditions. The test comes about appeared a significant reduction within the time required to prepare settlement applications, a diminishment within the number of blunders, and an advancement within the in general organization of the method. The work is of viable significance for the organizations of instructive teach looking for to progress the effectiveness of quarters administration, as well as for computer program engineers who specialize in making computerization frameworks for instructive teach.

Keywords: UML diagrams, automation, administrators, users, modeling, ordering a room.

Самчук Л.М., Повстяна Ю.С. Автоматизація процесу поселення в гуртожитки з використанням єдиної мови моделювання UML. У даній роботі розглядається автоматизація процесу поселення в гуртожиток, зокрема бронювання номерів. Основною метою дослідження є розробка ефективної системи, яка дозволяє автоматизувати та оптимізувати процеси поселення студентів у гуртожиток, зменшити витрати часу та ресурсів, підвищити зручність та задоволеність користувачів. У роботі проаналізовано існуючі системи та методи бронювання номерів, виявлено їх недоліки та переваги. На основі цього аналізу розроблено нову автоматизовану систему, що включає зручний інтерфейс для користувачів та адміністрації гуртожитку, функціонал бронювання та резервування кімнат, облік вільних місць, інтеграцію зі студентською базою. Для розробки системи використовувалися діаграми UML, включаючи діаграми випадків, діаграми діяльності та діаграми послідовності, які допомогли детально спланувати структуру та поведінку системи. Основними результатами досліджень є створення прототипу системи та перевірка її ефективності в реальних умовах. Результати тестування показали значне скорочення часу обробки заявок на розрахунки, зменшення кількості помилок та покращення загальної організації процесу. Робота має практичне значення для адміністрацій навчальних закладів, які прагнуть підвищити ефективність управління гуртожитками, а також для розробників програмного забезпечення, які спеціалізуються на створенні систем автоматизації навчальних закладів.

Ключові слова: UML діаграми, автоматизація, адміністрування, користувач, моделювання, поселення в гуртожиток.

Introduction. The current hostel check-in process is often complex and inefficient, requiring significant effort from both administrators and students. The lack of an automated system to manage the accommodation check-in process increases the risk of error and the time taken. In order to develop an effective automated system, it is necessary to create a detailed model of the hostel check-in process. UML diagrams are a powerful tool for modelling and visualising systems and can be used to represent the check-in process.

The UML recommends a standard arrangement of diagrams and a documentation for demonstrating object-oriented frameworks and presents the main semantics of what these diagrams and symbols mean. Therefore, this study presents Web Based Hostel Reservation System with UML, an extension of UML covering the main parts of the reservation system at the different perspectives and diagrams of UML. In this study illustrated web-based hostel reservation system using UML to have meaningful and standardized behavioural specifications of reservation system would make it feasible to determine the properties and enable more thorough and less costly.

The main system components such as hostels, rooms, administrators and users should be defined and represented in UML diagrams. It is important to determine how the main components of the system interact with each other during the boarding process. A class diagram can be used to show the structure of a system and the relationships between its components. A sequence diagram can be used to show the interaction

between components during the room booking process. A state diagram can be used to show the different states a room can be in (e.g. free, booked, occupied). Once the UML diagrams have been created, they should be analysed and used to develop an automated student accommodation billing system.

Literature review. In the paper [1] this paper proposes the advancement of an computerized residence administration framework. The codes for the mechanized framework were created utilizing Visual Essential, and Microsoft Get to was utilized to create the most database. The created framework dispenses with the deficiencies of conventional residence administration strategies; it is more helpful, graphical client interface-oriented, solid, effective, and ensured by get to control instruments. Research [2] showed that the online marketplace platform was targeted at a large number of hostel searchers, using an architectural proposal to model an authentic hostel market, a software architecture developed on the Information Systems platform, using technologies: geolocation, Google Maps API, artificial intelligence, and speech recognition API.

The paper [3] portrays a extend that addresses the issues of lodging administration and maintains a strategic distance from the issues that emerge when it is done physically. It is anticipated that this venture will diminish the burden on individuals and incredibly encourage the method of distributing inns for understudies and hostel directors with the assistance of this program. In this way, the number of lodgings for the settlement of understudies beneath thought in this college will be advance expanded.

In the work [4] the proposed framework, which is able of collecting point by point data almost the understudy residence in a convenient way, can precisely and viably the residence settlement insights, the residence power circumstance, the understudies wellbeing status within the residence and the remote staff entering and clearing out the information, make the understudies residence work administration staff can get it the understudy quarters in detail in genuine time and alter the understudy quarters administration procedures agreeing to the information to successfully fathom the issue of topsy-turvy data for the majority understudies to supply a great benefit stage. As displayed within the work [5] the Hostel Management system may be a web application that's made for overseeing diverse exercises within the lodging. This extend is expected to limit human work and make inn allotment much less demanding for understudies and lodging chairmen with the assistance of the net application to the lodging, normally select the understudy from the holding up list and mess charging, out pass era, complaint enrollment, and so forward. In the article [6] it is proposed to use an electronic governance system to solve the identified problems. The proposed system allows the student to register on the Internet and provides him/her with an ID card. The proposed system collects information about students in an electronic archive, which can simplify the import of their information in the future.

The authors [7] have developed an automation system for dormitory settlement using fuzzy logic (Mamdani algorithm) to optimize room allocation while considering residents' psychological compatibility. A comprehensive analysis of existing solutions was conducted, identifying their shortcomings, and a prototype was implemented in the FUZZY LOGIC environment to enhance transparency and settlement management efficiency.

The creators [8] contend that in most understudy residences in creating nations, numerous individuals live in single-function quarters. The division of the residence is as well settled, coming about within the quarters frequently missing utilitarian spaces. This brings a parcel of burden to the understudy instructing and administration staff. By separating the residence into a few diverse categories concurring to their usefulness through the shrewdly plan of entryway locks, the framework can accomplish more proficient and adaptable asset allotment, which not as it were makes a difference the school administration, but moreover benefits the understudies.

Researches Methodology. The utilize of UML charts within the field of software engineering is getting to be increasingly common. They are utilized to characterize and record frameworks, making a difference to distinguish the necessities and scope of systems and applications. The most objective of these ponders is to efficiently survey the writing on the utilize of UML graphs in computer program designing investigate [9-10]. Bound together Modeling Dialect is utilized to indicate, visualize, alter, develop, and record the artifacts of an object-oriented software-intensive framework beneath advancement. Amid this distinctive charts are drawn agreeing to require & the sorts of prerequisites. The require of this ponder is to discover out the significance of diverse graphs (use-case, grouping, and movement) amid computer program improvement [11].

The framework plan is the stage where designers attempt to address the framework prerequisites distinguished within the examination stage of the advancement arrange. It begins by understanding how the system works to realize the specified framework usefulness. Usually done by utilizing Bound together

Modeling Dialect (UML) diagrams which visualize the components of the framework engineering. Since there are so numerous UML graphs with distinctive purposes, as it were a couple of and the basics are utilized for this paper. These considers affirm the significance of utilizing UML graphs to computerize the residence check-in handle. They appear how UML can be utilized to imagine and make strides real-world forms.

In today's world, robotization is getting to be increasingly common in different circles of life. One of these ranges is the administration of lodgings. This prepare includes a few complex errands, such as room assignment, administration of inhabitation demands, and room inhabitation control. UML graphs can be utilized to robotize this prepare. Utilize case graphs are behavioral charts that visualize the interaction between on-screen characters and the framework. On-screen characters, which can be clients or other frameworks, are substances that control the usefulness of the framework. Utilize cases chart gives a rearranged see of what the framework does by recognizing framework functionalities and how they associated with inner and outside performing artists. Within the lodging administration framework, there are five on-screen characters, understudy, admin, database, head of the quarters, and location which have diverse parts that the framework reacts to appropriately. A utilize case chart can be upheld by a case portrayal for more understanding. This depiction can give more detailed data which isn't included within the graph due to effortlessness and coherence requests. Table 1 includes a description of the diagram of the website for booking a room in a hostel.

Table 1 – Description of the diagram of the website for booking a room in a hostel

Student	Reserves a room, fills in personal data, views available rooms
Admin	Fills in data about the rooms and monitors the functionality of the site
Database	The place to save personal data of each student
Head of the dormitory	An employee of the dormitory who provides data to the administrator and confirms the reservation to students
Site	Displays all information about places in the dormitory

A graphical interpretation of Table 1 is given in Figure 1

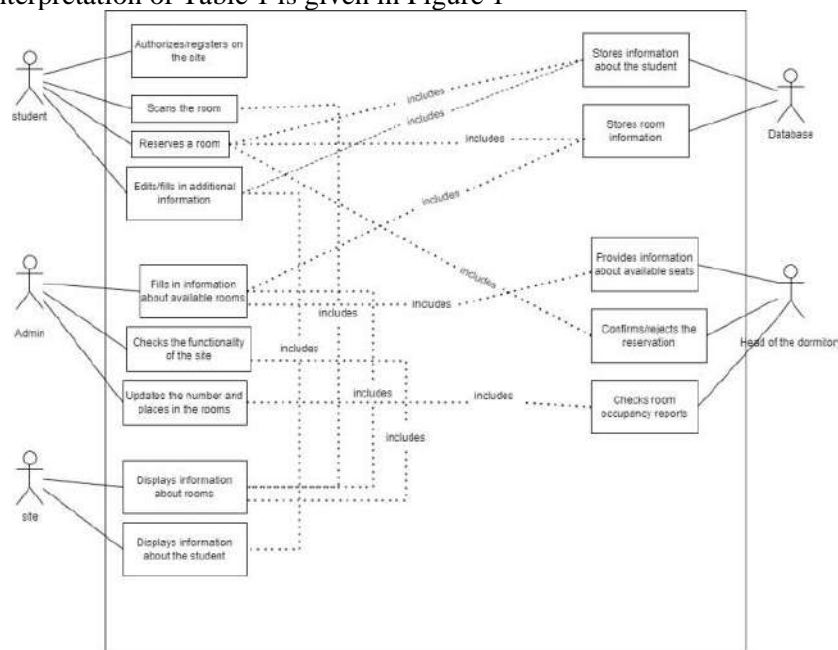


Fig. 1 – Diagram of precedents for displaying the operation of the site for booking a room

The proposed structure is key to guaranteeing students' comfort when looking for data approximately lodging openings. An imperative condition is that the asset keeps up an alluring appearance and usefulness. A use-case chart captures these component connections. Arrangement charts appear the interaction of components of a framework in a arrangement of time. In this chart, time is demonstrated on the vertical hub, whereas framework objects are adjusted on the flat pivot. It moreover visualizes the arrange of execution of messages and choices within the engineering of the framework to be outlined. Table 2. includes a detailed description of the components of a sequence diagram for displaying processes.

Table 2 – Description of the components of a sequence diagram for displaying processes

Authorizing / registering	The student registers if he enters the site for the first time or authorizes if he has already visited it.
Stores student data	The data entered by the student is stored in the database.
Transmits information about the student.	Information is stored in the database, which is then provided to the dormitory for entering data into its database.
Provides information about the room	The head of the dormitory provides information to the administrator about free rooms, places, risers, etc.
Fills in information about the room	The administrator fills in the provided information in the database
Stores room information	The database stores and updates the information entered by the administrator.
Displays information for the user	All information from the database about the rooms is displayed on the website.
Fills in additional information	The student fills in additional information (place of residence, whether there is a benefit, etc.)
Stores data in the database	Additional information about the student is also stored in the database.
Reserves a room	The student, having chosen a room to his liking, books it
Waiting for room confirmation / rejection	After booking, the student is waiting for a notification about the approval or rejection of the reservation of the room – accommodation.
Confirms / rejects room reservation	After the student has booked a room, the dormitory confirms or rejects the settlement.
Updates the settlement about the room	When deciding on a room reservation, the administrator updates the information that the room or place is already occupied. Nothing changes when the reservation is rejected.
Displays updated room information	After updating the information by the administrator, the site displays the new information.

The components of a grouping chart for speaking to forms are visualized in Figure 2.

An movement graph may be a behavioral graph that appears the energetic angles of a framework. It portrays the stream of the framework from an starting system-triggering act of a client to decision-making steps and framework yields.

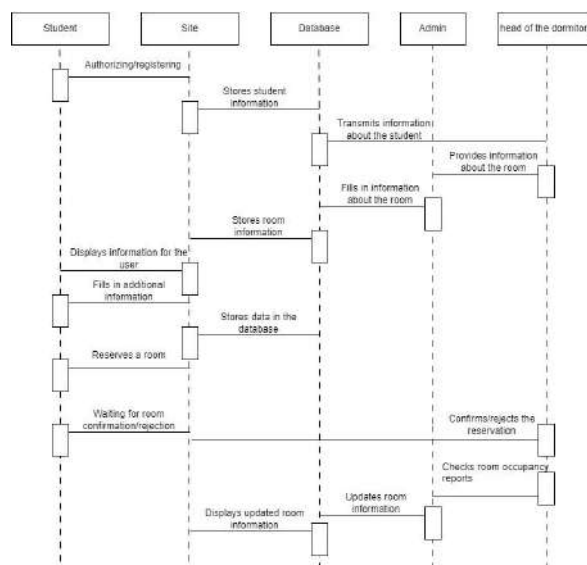


Fig. 2 – Sequence diagram

The graph underneath visualizes the workflow to illustrate the room reservation prepare. Table 3 incorporates a nitty gritty depiction of the room reservation handle.

Table 3 – Detailed description of the room reservation process

Login to the site	The student enters our site
Are you registered?	If the student is on the site for the first time, then he needs to register, if not, then he must log in
You are on the site	After registration/authorization, you get to the room reservation site, after which the choice is made
Go to the profile tab	A page with additional information about the student
Did you fill in additional information?	If yes, then it is possible to edit the information, if not, then you need to enter it
Book a room	This is a button on the room reservation page, after which you choose the room you like
Filling the "filter" of the room	You need to filter the room, i.e. male or female, and also select the faculty
View available rooms	We are looking at all the rooms that are available for our faculty
Booking a room you like	Actually, booking a room
Waiting for an answer about settlement	The student is waiting for an answer about settlement or rejection

Based on Table 3, an algorithm was developed (Fig. 3).

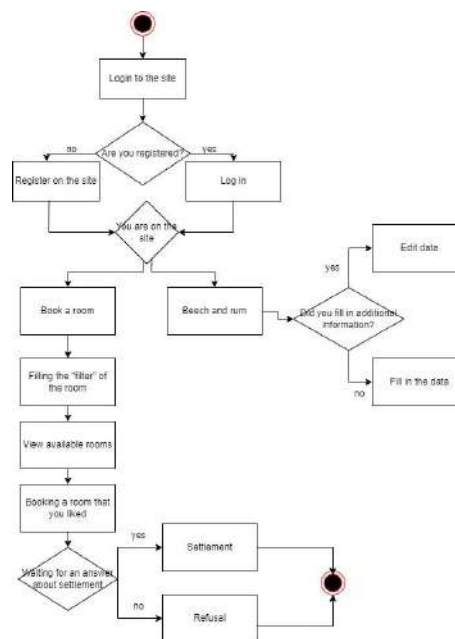


Fig. 3 – Activity diagram to demonstrate the room reservation process

Results. This ponder brought about in creating a framework for disseminating participants to residence rooms, considering their individual characteristics, scholarly execution, inclinations, and way of life. The proposed framework points to extend the consolation of living and make an environment conducive to students' advancement.

The reason of this try is to consider individual characteristics, academic performance, inclinations, and lifestyle in planning a framework for distributing understudies to residence rooms. By bookkeeping for the conclusions of understudies who have as of now experienced the adjustment period in residences, this approach points to progress consolation levels, social adjustment, and students' scholarly execution. Also, it will enable the modeling of a UML chart to imagine the framework design components for designers, encouraging the creation of a room reservation framework for understudy quarters. The think about is based on subjective and quantitative examination of the collected information. Members were educated almost

the reason of the study and told that the inquire about points to accumulate their suppositions on their encounter of adjusting to residence living so that the results and recommendations might be considered within the advancement processservices (Table 4).

Table 4 – Target audience survey results

Questions	Options for responses	Numerosity
Which year of study you are?	1st year of study	20
	2nd year of study	16
	3rd year of study	14
Do you prefer to live with roommates from the same faculty as yours?	I want to live only with roommates from the same faculty as mine	26
	I prefer to live with roommates from the same faculty as mine. However, if that's not possible, I am open to living with roommates from a different faculty	18
	I don't mind whether my roommates are from the same faculty as mine	6
Do you prefer living with roommates who will maintain cleanliness in your room?	I often clean my room and hope that my roommates do the same	31
	I clean my room from time to time and hope that my roommates do the same	19
	I don't mind how often my room is cleaned. I just hope that basic cleanliness is maintained in my room	–
Interaction with my roommates	I have an extroverted personality, and I would prefer my roommates to communicate with me in a lively manner	14
	I have an introverted personality, and I would prefer my roommates to communicate with me quietly	10
	I don't care if my roommates talk to me loudly or quietly	26
How satisfied are you with your roommates?	well	34
	good	12
	satisfactorily	4
Is it important to consider the academic performance of roommates when allocating rooms for first-year students?	important	37
	not important	13
Are factors such as smoking, hobbies, interests, preferences, sports, etc., important in influencing the relationships between roommates?	yes	23
	no	23
	indifferently	4

The learning members were understudies of Lutsk National Technical University (LNTU) dwelling in residences. A add up to of 50 understudies were chosen for the inquire about. The test was shaped with thought of the differences of resources and the individual characteristics of the understudies. Information collection was conducted employing a Google Shapes survey. The essential center was on parameters such as the specifics of intelligent between roommates, strategies for upgrading versatility, and components impacting their connections (smoking, cleanliness, melodic inclinations, sports interface, etc.). All questions were defined essentially and concisely to guarantee they were effectively caught on by all respondents. The collected information was handled utilizing factual strategies. The taking after key discoveries were distinguished: The larger part of understudies favor roommates who share their values with respect to cleanliness, communication, and scholarly execution; Components affecting connections between roommates are critical for half of the respondents; The advancement of an assignment framework ought to consider workforce, scholastic execution, individual characteristics, and communication

inclinations. This approach will offer assistance make a supportive environment for understudies within the residence.

Conclusions. The study demonstrated that the use of UML diagrams for automating the student dormitory settlement process significantly improves management efficiency and minimizes administrative costs. The implementation of this system will automate room reservations, reducing the processing time for settlement applications by nearly half compared to the traditional method. The introduction of an automated room allocation mechanism based on personal characteristics and academic performance helps create a more comfortable living environment. The use of UML diagrams in the development process ensured clear system modeling, enhancing the quality of its implementation and further maintenance. The obtained results confirm the feasibility of using automated systems for student dormitory management. Future research may focus on expanding the system's functionality and integrating it with other university management platforms.

References

1. Ayanlowo, K., Shoewu, O.O., Olatinwo, S.O., Omitola, O.O., & Babalola, D. (2014). Development of an Automated Hostel Facility Management System. *Management System Journal of Science and Engineering* Vol. 5 (1), pp. 01-10.
2. Shivam Singh, OmkarBhagat, SmitPawade. Review on hosteller -a platform for finding and booking hostel. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. Vol. 03 Issue 04 (2021) pp. 1367-1370.
3. Dinesh. B, GogulNithin. R, Pavatharani. R, Sneha. R, C. Senthilkumar. Implementation Of Hostel Management With Automation Using Design Thinking. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)* Volume 10, Issue 4 (2022) pp. e156-e161.
4. M. Peng, X. Xie. The Design of Dormitory Management System for College Students Based on Android Platform. *Advances in Intelligent Systems Research*. pp. 1872-1875.
5. M. Gudadhe, A. Bhojer, A. Karwade. Automated hostel facility management system website. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. Vol. 04, Issue 06 (2022) pp.1983-1987.
6. Hasan Jihad, K. (2018). Automatic Enrollment System for Student Dormitory, *Kirkuk Journal of Science*, 13(2), pp. 68-81.
7. Sytnyk, N. V., and M. M. Kuzyk. "Computer Support of the Settlement Process Management in the Campus of Higher Education Institutions." *Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman*, 2019, p.186-201.
8. Yuanzhe Jin, Chenrui Zhang, Maorong Wang. Otaku: Intelligent Management System for Student-Intensive Dormitory. *CoRR* abs/2104.07630(2021).
9. ObjectManagementGroup (OMG). (2017). UML 2.5 Specification. Retrieved from OMG Website.
10. Ambler, S. W. *The Object Primer: Agile Model-Driven Development with UML 2.0*. Cambridge University Press, 2004.
11. Samchuk, L., & Povstiana, Y. UML diagrams of the management system of maintenance stations. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 14(4), 2024, 141-145.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-02>

УДК 004.89:658.5

Примиська Світлана Олексіївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-5832-0686>

Абрамова Алла Олександрівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-3475-8584>

Складанний Денис Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-3624-5336>

НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

Примиська С.О., Абрамова А.О., Складанний Д.М. Інтеграція штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів. Досліджено впровадження штучного інтелекту в автоматизацію промислових процесів, що є ключовим напрямом цифрової трансформації виробництва. Установлено, що застосування алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж, комп'ютерного зору та когнітивних обчислень сприяє підвищенню продуктивності, оптимізації управління ресурсами та мінімізації людського втручання в технологічні операції. Метою статті є аналіз ролі штучного інтелекту в автоматизації промислових процесів та розроблення підходів до його ефективної інтеграції для підвищення продуктивності та адаптивності виробничих систем. Для досягнення цієї мети застосовано системний аналіз для визначення впливу штучного інтелекту (ШІ) на промислову автоматизацію, методи порівняльного аналізу для оцінювання наявних підходів до впровадження інтелектуальних технологій, прогнозне моделювання для надання оцінки ефективності автономних систем і структурно-функціональний підхід для розроблення інтеграційної моделі. Виявлено основні проблеми впровадження штучного інтелекту в промислову автоматизацію, серед яких висока вартість інтеграції, складність адаптації ШІ-алгоритмів до змінних умов виробництва, необхідність модернізації технологічної інфраструктури та ризики, пов'язані з кібербезпекою. Доведено, що ефективність інтеграції штучного інтелекту у виробничі процеси значною мірою залежить від вибору відповідного підходу: централізованого, децентралізованого або гібридного. Запропоновано концептуальну модель такої інтеграції, що передбачає сенсорний рівень збору даних, аналітичний рівень оброблення та управлінський рівень прийняття рішень, що дозволяє оптимізувати керування виробничими системами в реальному часі. Сформульовано рекомендації щодо ефективного впровадження штучного інтелекту в промислові процеси, що включають аналіз технологічних можливостей підприємства, адаптацію алгоритмів під специфіку виробництва, забезпечення кібербезпеки та підготовку персоналу до роботи з інтелектуальними технологіями. Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні методів адаптивного машинного навчання, створенні самонавчальних ШІ-систем, оптимізації взаємодії автономних ШІ-модулів із централізованими управлінськими платформами та розробленні методів оцінювання ефективності штучного інтелекту в автоматизованих виробничих середовищах.

Ключові слова: цифрова оптимізація, прогнозне управління, автономні системи, когнітивні алгоритми, кіберфізичні технології.

Prymyska S., Abramova A., Skladannyj D. Integration of Artificial Intelligence into Industrial Process Automation Systems. The article investigates the introduction of artificial intelligence into the automation of industrial processes, which is a key area of digital transformation of production. It has been established that the use of machine learning algorithms, neural networks, computer vision, and cognitive computing helps increase productivity, optimise resource management, and minimise human intervention in technological operations. The article aims to analyse the role of artificial intelligence in the automation of industrial processes and develop approaches to its effective integration to increase the productivity and adaptability of production systems. To achieve this goal, the article uses system analysis to determine the impact of artificial intelligence (AI) on industrial automation, comparative analysis methods to assess existing approaches to the implementation of intelligent technologies, predictive modelling to assess the efficiency of autonomous systems and a structural-functional approach to developing an integration model. The main problems of introducing artificial intelligence into industrial automation include the high integration cost, the complexity of adapting AI algorithms to changing production conditions, the need to modernise technological infrastructure, and cybersecurity risks. It is proved that the effectiveness of integrating artificial intelligence into production processes largely depends on the choice of an appropriate approach: centralised, decentralised or hybrid. The article proposes a conceptual model of such integration, which includes a sensor level of data collection, an analytical level of processing, and a managerial level of decision-making, which allows for the management of production systems to be optimised in real time. The article formulates recommendations for the effective implementation of artificial intelligence in industrial processes, including analyzing an enterprise's technological capabilities, adapting algorithms to the specifics of production, ensuring cybersecurity, and training personnel to work with intelligent technologies. Prospects for further research include improving adaptive machine-learning methods, creating self-learning AI systems, optimising the interaction of autonomous AI modules with centralised management platforms, and developing methods for assessing the effectiveness of artificial intelligence in automated production environments.

Keywords: digital optimisation, predictive control, autonomous systems, cognitive algorithms, cyber-physical technologies.

Постановка проблеми. Інтеграція штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів є ключовим напрямом підвищення ефективності, адаптивності та безперервності

виробничих операцій. Традиційні алгоритми управління мають обмежену гнучкість і не завжди здатні адаптуватися до змінюваних умов, що зумовлює необхідність використання самонавчальних моделей для аналізу даних, прогнозування та оптимізації процесів. Упровадження алгоритмів машинного навчання та розпізнавання дозволяє автоматизувати контроль якості, оптимізувати логістику, прогнозувати несправності та покращувати управління виробничими ресурсами. Важливість дослідження визначається потребою в підвищенні конкурентоспроможності підприємств, мінімізації впливу людського фактора та забезпеченні цифрової трансформації виробництва. Використання інтелектуальних технологій сприяє розвитку самонавчальних систем, здатних приймати автономні рішення на основі аналізу динамічних параметрів, що є необхідним для впровадження концепції Індустрії 4.0.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в системи автоматизації промислових процесів сприяє підвищенню продуктивності, оптимізації ресурсів та мінімізації витрат. Аналіз наукових праць демонструє три ключові напрями досліджень: загальні принципи впровадження штучного інтелекту; практичні рішення для автоматизації управління та виробничих процесів; виклики й перспективи інтеграції штучного інтелекту.

Загальні тенденції та принципи цифрової трансформації виробництва розглянуто в роботах К. Чижмар (К. Chyzhmar) зі співавторами [1], де акцент зроблено на питаннях інформаційної безпеки, та Д. Чанкветадзе і Л. Фешанича [2], які досліджують адаптацію систем управління до Індустрії 4.0. Автоматизація логістичних процесів через прогнозні алгоритми є предметом дослідження О. Круковської з колегами [3], які відзначають підвищення ефективності постачання продукції. М. Маєтний [4] аналізує адаптивність інтелектуальних систем керування, що дозволяє збільшити швидкість реакції виробництва на зміну умов. У. Ніконенко і Ю. Мандзіновський [5] досліджують застосування штучного інтелекту для підвищення економічної безпеки підприємств, демонструючи скорочення фінансових ризиків через автоматизований моніторинг. Для доповнення цих досліджень варто зосередитися на розробленні універсальних інтеграційних стандартів для різних галузей промисловості.

Практичні аспекти застосування штучного інтелекту для управління виробничими процесами охоплюють дослідження Дж. Ванг (J. Wang) та співавторів [6], де доведено ефективність глибокого навчання в прогнозуванні несправностей обладнання. Дж. Ли (J. Lee) та ін. [7] демонструють покращення виробничої аналітики через упровадження розширеного аналізу даних. Ю. Лу (Y. Lu) зі співавторами [8] оцінюють ефективність стандартів автоматизації, відзначаючи необхідність їх оновлення відповідно до сучасних вимог. А. К. Туагі (A. K. Tuagi) та колеги [9] підкреслюють можливості інтелектуальної автоматизації в Індустрії 4.0, показуючи підвищення продуктивності завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання. Т. Янг (T. Yang) та співавтори [10] демонструють, що використання адаптивних моделей управління сприяє зростанню ефективності виробничих процесів. У подальших дослідженнях мають бути розглянуті питання підвищення автономності ШІ-систем та їх здатності самонавчатися в змінних виробничих умовах.

Проблеми та перспективи впровадження штучного інтелекту в автоматизовані промислові системи проаналізовано в працях Р. Бойна (R. Boina) та співавторів [11], де розглянуто підвищення ефективності бізнес-процесів через інтеграцію інженерії даних. Р. С. Перес (R. S. Peres) та ін. [12] виділяють основні бар'єри впровадження, як-от стандартизація даних та навчання персоналу. А. Виндман (A. Windmann) з колегами [13] досліджують проблеми сумісності промислових ШІ-систем, пропонуючи методи їх оптимізації. Д. Аїга (D. Ajiga) та співавтори [14] демонструють роль програмного забезпечення в автоматизації, показуючи необхідність розширення можливостей автоматизованого контролю. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на створення ефективних алгоритмів обміну даними між різними виробничими ШІ-системами та вдосконалення механізмів їх безпечного функціонування.

Результати аналізу свідчать, що інтеграція штучного інтелекту в промислові процеси забезпечує значне покращення ефективності управління, автоматизації виробництва та прогнозування технічного стану обладнання. Водночас важливими залишаються питання стандартизації, безпеки та взаємодії між різними інтелектуальними системами, що визначає напрями подальших досліджень.

Виділення раніше не вирішених частин проблеми. Незважаючи на значний прогрес у впровадженні штучного інтелекту в промислову автоматизацію, залишаються нерозв'язаними питання ефективної інтеграції ШІ-алгоритмів для забезпечення автономного управління. Відсутність єдиного підходу до вибору оптимальної ШІ-моделі для різних типів виробництва

ускладнює адаптацію інтелектуальних систем до змінних умов. Недостатньо досліджено довготривалий вплив машинного навчання та нейронних мереж на стійкість виробничих процесів, а також відсутні методики оцінювання ефективності штучного інтелекту в складних виробничих середовищах. Відомі моделі інтеграції ІІІ-систем часто орієнтовані на конкретні сфери та не враховують необхідність гнучкого управління ресурсами, що обмежує їх практичне застосування.

Важливим викликом залишається проблема кібербезпеки, адаптивності ІІІ-алгоритмів до реальних виробничих змін і висока вартість інтеграції, що ускладнює широкомасштабне використання технології. Недостатньо розроблено рекомендації для поетапного впровадження штучного інтелекту, зокрема щодо вибору між централізованими, децентралізованими та гібридними моделями управління. Запропоноване дослідження спрямоване на усунення цих прогалин шляхом створення концептуальної моделі ІІІ-інтеграції, надання оцінки її ефективності в автономних виробничих процесах та розроблення практичних підходів до оптимізації впровадження інтелектуальних технологій у промисловість.

Метою статті є аналіз ролі штучного інтелекту в автоматизації промислових процесів та розроблення підходів до його ефективної інтеграції для підвищення продуктивності та адаптивності виробничих систем.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- 1) проаналізувати основні методи та підходи до інтеграції штучного інтелекту у виробничі процеси, оцінюючи їх ефективність для підвищення автономності управління;
- 2) розробити концептуальну модель інтеграції штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів, що забезпечить адаптивність, гнучке управління ресурсами та прогнозне керування;
- 3) сформулювати рекомендації щодо оптимізації впровадження штучного інтелекту в промислові процеси з огляду на технологічні обмеження, ризики та перспективи розвитку автономних систем.

Виклад основного матеріалу. Інтеграція штучного інтелекту в автоматизовані промислові системи є ключовим етапом цифрової трансформації виробництва, що спрямований на підвищення ефективності, точності та адаптивності технологічних процесів. Основні методи впровадження штучного інтелекту охоплюють машинне навчання, комп'ютерний зір, нейронні мережі, експертні системи та когнітивні обчислення, які забезпечують автономне прийняття рішень на основі аналізу великих масивів даних. Кожен із цих методів має свої особливості застосування, що залежить від типу виробничого процесу, обсягу доступних даних та необхідного рівня автономності системи управління. Таблиця 1 містить узагальнену характеристику основних методів впровадження штучного інтелекту в автоматизовані промислові системи, їхні ключові особливості, застосування та переваги.

Таблиця 1. Основні методи впровадження штучного інтелекту в автоматизовані промислові системи

Метод	Опис	Основні сфери застосування	Очікуваний результат
Машинне навчання	Аналізує та прогнозує виробничі процеси, виявляючи закономірності в даних	Контроль якості, прогнозування відмов обладнання	Зменшення простоїв, оптимізація технічного обслуговування
Комп'ютерний зір	Використання камер та алгоритмів для розпізнавання об'єктів та дефектів	Автоматизований контроль якості, робототехніка	Підвищення точності дефектоскопії, мінімізація браку
Нейронні мережі	Самонавчальні системи, що імітують роботу людського мозку	Оптимізація логістики, розумне керування ресурсами	Автоматизація прийняття рішень, зниження операційних витрат
Експертні системи	Використання баз знань і правил для автоматизованого прийняття рішень	Автоматизований моніторинг процесів, розподіл навантажень	Покращення контролю параметрів, підвищення стабільності виробництва
Когнітивні обчислення	Аналіз складних даних у реальному часі за допомогою штучного інтелекту та Big Data	Інтелектуальне управління виробництвом, оброблення потокових даних	Прискорення аналізу та адаптація виробництва до змінних умов

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 4; 8; 9]

Методи штучного інтелекту відіграють ключову роль у трансформації автоматизованих промислових систем, сприяючи підвищенню точності операцій, зниженню витрат та забезпеченню автономності виробничих процесів. Зокрема, в металургійному виробництві машинне навчання використовується для прогнозування деградації обладнання та оптимізації параметрів плавки. Наприклад, компанія ArcelorMittal впровадила цифрові алгоритми для аналізу змін у структурі

сплавів у реальному часі, що дозволяє мінімізувати дефекти й підвищити якість металопродукції [15].

У машинобудуванні комп'ютерний зір застосовується для автоматизованого контролю якості деталей. Це реалізовано на виробництві BMW Group, де системи штучного інтелекту аналізують поверхневі дефекти кузова на мікроскопічному рівні, що дозволяє скоротити кількість браку та підвищити точність виробничих процесів [16].

У сфері логістики нейронні мережі значно покращують управління постачанням та оптимізацію складських операцій. Наприклад, компанія DHL використовує методи розширеної аналітики, що дозволяють автоматично прогнозувати логістичні ризики та знижувати затримки в постачанні продукції [17].

У хімічній промисловості експертні системи забезпечують автоматизований контроль технологічних параметрів. Зокрема, на підприємствах BASF штучний інтелект використовується для аналізу процесів оброблення сільськогосподарських культур та прогнозування оптимальних умов вирощування, що сприяє ефективному використанню ресурсів [18].

Когнітивні обчислення знайшли застосування в нафтопереробній галузі. Компанія Shell розробила ШІ-алгоритми для управління природними ресурсами, що аналізують потоки даних із різних екосистем та дозволяють оптимізувати стратегії видобутку, зменшуючи вплив на довкілля [19].

На рівні системного впровадження штучного інтелекту в промисловості компанія Siemens інтегрує ШІ-технології в автоматизовані системи управління, що дозволяє адаптивно контролювати виробничі процеси та зменшувати вплив людського фактора [20].

Використання цих технологій сприяє формуванню концепції Індустрії 4.0, яка передбачає створення самонавчальних систем, здатних автономно аналізувати великі масиви даних, приймати рішення та адаптуватися до змін зовнішнього середовища без втручання людини.

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту у виробничі процеси є ключовим фактором підвищення їх автономності, гнучкості та ефективності. Залежно від рівня автоматизації, структури виробництва і цілей оптимізації підприємства застосовують різні підходи до впровадження штучного інтелекту, які можна умовно розділити на централізовані, децентралізовані та гібридні моделі. Централізовані підходи передбачають інтеграцію штучного інтелекту в систему керування виробництвом через єдиний цифровий центр оброблення даних, що дозволяє забезпечити контроль за всіма процесами в межах підприємства. Децентралізовані методи базуються на використанні розподілених ШІ-алгоритмів безпосередньо на рівні виробничих одиниць, що сприяє автономному прийняттю рішень. Гібридні підходи поєднують централізоване управління з локальними ШІ-рішеннями, що забезпечує високу адаптивність до змінних умов та оптимізацію роботи окремих виробничих вузлів.

У таблиці 2 узагальнено характеристики основних підходів до інтеграції штучного інтелекту у виробничі процеси, зважаючи на рівень автономності, можливості адаптації та основні сфери застосування.

Таблиця 2. Підходи до інтеграції штучного інтелекту у виробничі процеси та їх вплив на автономність управління

Підхід	Основні характеристики	Рівень автономності	Основні сфери застосування
Централізований	Управління всіма процесами через єдину ШІ-платформу, аналіз великих масивів даних, централізована оптимізація	Середній	Автоматизоване планування, контроль якості, прогнозування збоїв
Децентралізований	Використання розподілених ШІ-систем на рівні виробничих вузлів, автономне прийняття рішень у межах локальних процесів	Високий	Роботизовані лінії, автономні транспортні системи, управління логістикою
Гібридний	Поєднання централізованого керування з локальними ШІ-модулями, адаптивна оптимізація на основі реального часу	Дуже високий	Інтелектуальні фабрики, гнучкі виробничі системи, адаптивні енергетичні мережі

Джерело: сформовано автором на підставі [3; 7; 12; 13; 14]

Сучасні виробничі підприємства використовують різні підходи до інтеграції штучного інтелекту залежно від рівня складності процесів, необхідної швидкості прийняття рішень і ступеня автономності системи. Централізована інтеграція дозволяє збирати великі обсяги даних з усіх виробничих ліній, аналізувати їх у режимі реального часу та коригувати параметри роботи

обладнання відповідно до аналітичних прогнозів. Такі системи найчастіше впроваджуються у великих заводських комплексах, де важливо підтримувати узгодженість усіх етапів виробництва та мінімізувати ризики збоїв через неефективне управління ресурсами.

Децентралізований підхід забезпечує автономну роботу окремих виробничих вузлів без необхідності постійного зв'язку із центральною системою. Це особливо важливо у виробництвах з великою кількістю роботизованих станцій або автономних транспортних платформ, де рішення повинні прийматися локально, адаптуючись до поточних умов. Використання алгоритмів машинного навчання в децентралізованих системах дозволяє самостійно налаштовувати параметри роботи обладнання з огляду на аналіз історичних даних і змін технологічного середовища.

Гібридний підхід поєднує переваги обох методів, забезпечуючи баланс між централізованим аналізом та локальною автономією. У таких системах центральна ШІ-платформа використовується для загального контролю, а автономні модулі оптимізують роботу окремих виробничих блоків. Це дає змогу забезпечити високу швидкість реагування на зміну параметрів процесу, зберігаючи можливість глобального планування та оптимізації. Наприклад, у виробництві високоточної електроніки гібридна модель дозволяє центральній системі контролю аналізувати загальний стан лінії, тоді як локальні ШІ-модулі керують окремими етапами, коригуючи параметри пайки або тестування залежно від поточного стану матеріалів та компонентів.

Інтеграція штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів є ключовим напрямом підвищення ефективності, гнучкості та автономності виробничих систем. Традиційні автоматизовані рішення базуються на алгоритмах жорсткої логіки, що обмежує їх здатність адаптуватися до динамічних змін технологічного середовища. Концептуальна модель інтеграції штучного інтелекту пропонує новий підхід, який ґрунтується на самонавчальних алгоритмах, здатних аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, адаптувати параметри роботи обладнання та автоматизовано приймати рішення без людського втручання.

Актуальність цієї моделі зумовлена необхідністю підвищення стійкості виробничих систем до непередбачуваних змін, оптимізації використання ресурсів і зниження експлуатаційних витрат. На відміну від чинних систем, які вимагають постійного контролю та коригування параметрів із боку операторів, запропонована модель забезпечує автономне управління через аналіз потокових даних та прогнозування потенційних ризиків. Вона побудована на основі поєднання методів машинного навчання, нейронних мереж та інтелектуального управління виробничими циклами.

Концепція передбачає три рівні інтеграції: сенсорний рівень, де відбувається збирання даних з обладнання та виробничих ліній; аналітичний рівень, який відповідає за оброблення та аналіз даних, використовуючи штучні нейронні мережі та алгоритми прогнозного моделювання; управлінський рівень, що виконує адаптивну оптимізацію процесів, забезпечує автономність прийняття рішень і взаємодію між локальними та централізованими ШІ-модулями (рис.1)

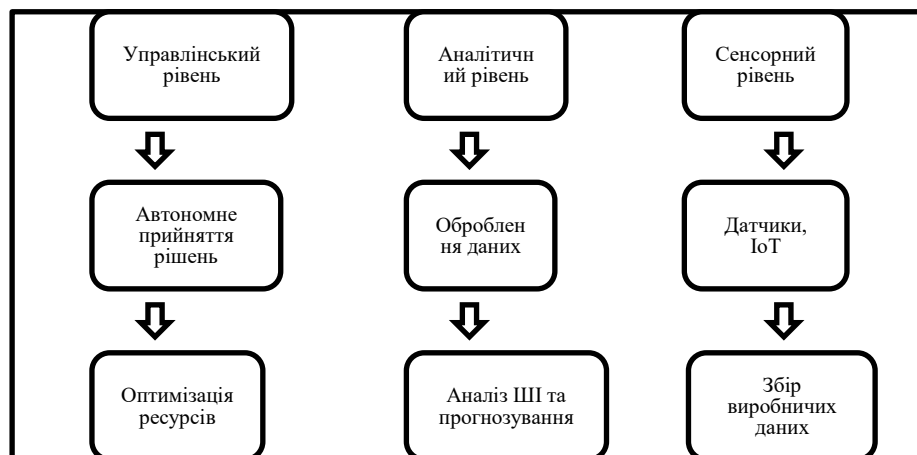


Рис.1. Концептуальна модель інтеграції штучного інтелекту в автоматизовані промислові процеси

Джерело: власна розробка автора

Запропонована модель функціонує через безперервний цикл збору, аналізу та адаптивного управління. На першому етапі сенсори збирають інформацію про стан обладнання, якість продукції та параметри навколишнього середовища. Ці дані передаються на аналітичний рівень, де алгоритми машинного навчання аналізують історичні та поточні показники, прогнозуючи можливі відмови, оптимізуючи розподіл ресурсів та визначаючи оптимальні режими роботи обладнання.

На управлінському рівні штучний інтелект приймає рішення про необхідність зміни технологічних параметрів, розподілу навантаження між виробничими лініями або коригування процесів для зниження енергоспоживання. Взаємодія між рівнями забезпечує самонавчання системи, що дозволяє їй покращувати ефективність роботи без потреби зовнішнього втручання.

У сучасних умовах така модель дозволяє підприємствам автоматизувати процеси не лише на рівні окремих виробничих вузлів, а й у масштабах усього заводу чи концерну. Це сприяє створенню гнучких виробничих систем, які можуть швидко адаптуватися до змін попиту, оптимізувати споживання ресурсів і знижувати витрати на обслуговування обладнання. Реалізація цієї концепції відкриває можливості для переходу до повністю автономних виробничих систем, що відповідають вимогам Індустрії 4.0 та забезпечують новий рівень ефективності промислового виробництва.

Використання штучного інтелекту в промисловій автоматизації відкриває широкі можливості для підвищення продуктивності, ефективності управління ресурсами та мінімізації людського втручання, проте цей процес супроводжується значними труднощами і викликами. Однією з ключових проблем є висока вартість запровадження інтелектуальних технологій, що включає не лише закупівлю обладнання та програмного забезпечення, але й витрати на адаптацію виробничих систем, навчання персоналу та забезпечення відповідної інфраструктури для оброблення великих масивів даних. Комплексність інтеграції штучного інтелекту в уже наявні автоматизовані системи також створює технічні бар'єри, оскільки багато підприємств працюють на застарілих технологіях, які не підтримують сучасні ШІ-рішення або потребують глибокої модернізації.

Додатковою складністю є питання кібербезпеки, адже автоматизовані виробничі системи, що використовують штучний інтелект, стають уразливими до атак, спрямованих на маніпуляцію даними або втручання в критично важливі процеси [15]. Оскільки ШІ-системи здебільшого функціонують на основі аналізу великих обсягів даних, ризики, пов'язані з витоком інформації, несанкціонованим доступом або зовнішнім втручанням, можуть мати серйозні наслідки для безперервності виробничих процесів та збереження комерційної таємниці.

Важливим викликом є необхідність забезпечення високої точності та надійності роботи ШІ-алгоритмів у виробничих умовах. Помилки в прогнозуванні технічних несправностей, неправильно налаштовані параметри оптимізації або некоректні вхідні дані можуть призводити до серйозних збоїв у роботі обладнання, що спричиняє фінансові втрати та зниження якості продукції [12]. Розв'язання цього питання вимагає постійного моніторингу роботи штучного інтелекту, періодичного оновлення моделей машинного навчання і тестування алгоритмів перед їх впровадженням у реальне виробництво.

Додатковою проблемою залишається недостатня адаптивність ШІ-систем до різних виробничих сценаріїв, що ускладнює їх застосування в досить важких і динамічних середовищах [10]. Нейромережі та алгоритми машинного навчання ефективно працюють у добре структурованих процесах із чіткими вхідними параметрами, однак у ситуаціях із високим рівнем невизначеності або частими змінами умов роботи вони можуть демонструвати нестабільні результати. Це вимагає гнучких механізмів адаптації, що передбачає інтеграцію штучного інтелекту з традиційними методами управління для створення комбінованих підходів.

Юридичні та етичні аспекти використання штучного інтелекту в промисловій автоматизації також створюють значні виклики. У деяких країнах законодавчі норми щодо відповідальності за рішення, прийняті ШІ-системами, ще не врегульовані, що створює правову невизначеність. Крім того, автоматизація на основі штучного інтелекту може впливати на ринок робочої сили, оскільки зниження потреби у фізичній праці та скорочення кількості робочих місць можуть мати соціальні наслідки. Розв'язання цих питань потребує розроблення комплексних стратегій, спрямованих на адаптацію працівників до нових умов, їх перекваліфікацію та створення нових робочих місць у сферах, пов'язаних із підтримкою та розвитком ШІ-рішень.

Оптимізація впровадження штучного інтелекту у виробничі процеси спрямована на забезпечення їх автономності, підвищення ефективності управління та зменшення впливу

людського фактора. Для досягнення цих цілей необхідно розробити комплексні заходи з огляду на технічні, організаційні та економічні аспекти інтеграції ШІ-технологій у виробництво.

Впровадження штучного інтелекту має базуватися на поступовій адаптації виробничих процесів до нових цифрових технологій, що передбачає поетапне оновлення інфраструктури, тестування ШІ-моделей та їх інтеграцію з наявними автоматизованими системами. Початковий етап має включати детальний аналіз виробничих процесів для виявлення ділянок, де штучний інтелект здатен забезпечити найбільшу ефективність. Це можуть бути системи контролю якості, прогнозування технічних несправностей, оптимізація логістичних операцій або управління енергоспоживанням.

Забезпечення безперервності виробничих процесів потребує створення надійної архітектури передачі та оброблення даних, що передбачає використання високопродуктивних обчислювальних платформ, хмарних сервісів і розподілених ШІ-модулів. Інтеграція інтелектуальних алгоритмів має бути спрямована на підвищення гнучкості управління виробництвом, що включає адаптивні моделі оптимізації виробничих потужностей, прогнозне технічне обслуговування та автоматизоване коригування технологічних параметрів.

Одним із ключових аспектів оптимізації є розроблення адаптивних моделей управління, що поєднують централізований контроль із локальною автономністю окремих виробничих вузлів. Це дозволяє підвищити стійкість виробництва до плинних зовнішніх умов і забезпечити швидке реагування на зміни в параметрах процесів. Використання гібридних ШІ-систем, що поєднують машинне навчання, нейронні мережі та експертні системи, дозволяє знизити ризики збоїв і забезпечити самонавчання алгоритмів у реальному часі.

Важливим аспектом упровадження штучного інтелекту є підготовка персоналу, що передбачає навчання операторів, інженерів і аналітиків працювати з інтелектуальними платформами, аналізувати ШІ-згенеровані рішення й оцінювати їх коректність. Крім того, забезпечення кібербезпеки є невід'ємною складовою частиною оптимізації, оскільки захист виробничих даних і ШІ-систем від зовнішніх загроз є критично важливим для безперервного функціонування підприємства.

Оптимізація інтеграції штучного інтелекту також передбачає розроблення стратегій гнучкого масштабування ШІ-систем, що дозволяє адаптувати технології під щораз більші виробничі потреби. Використання штучного інтелекту для автономного контролю якості продукції, зменшення відходів, прогнозування попиту та управління складськими запасами сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів та зниженню витрат.

Забезпечення автономності виробництва через ШІ-управління дозволяє мінімізувати людське втручання в рутинні процеси, що сприяє зменшенню впливу людського фактора та зниженню ймовірності помилок. У довгостроковій перспективі правильне впровадження штучного інтелекту формує основу для створення повністю цифрових підприємств, що відповідають концепції Індустрії 4.0, забезпечуючи високу ефективність, стабільність і конкурентоспроможність виробництва.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі аналізу інтеграції штучного інтелекту в системи автоматизації промислових процесів встановлено, що використання інтелектуальних алгоритмів дозволяє значно підвищити автономність, адаптивність і ефективність виробничих систем. Виявлено, що застосування машинного навчання, нейронних мереж, комп'ютерного зору та когнітивних обчислень сприяє оптимізації управління ресурсами, прогнозуванню технічних несправностей і покращенню якості продукції. Розроблена концептуальна модель інтеграції штучного інтелекту передбачає тривірневу структуру – сенсорний, аналітичний та управлінський рівні, що забезпечують автоматизоване прийняття рішень, гнучке управління виробничими процесами та мінімізацію людського втручання.

Основними проблемами впровадження штучного інтелекту в автоматизацію виробництва є висока вартість інтеграції, необхідність модернізації наявних систем, складність адаптації ШІ-алгоритмів до динамічних умов виробництва та ризики, пов'язані з кібербезпекою. Визначено, що недостатня адаптивність алгоритмів машинного навчання до змінних середовищ і відсутність універсальних стандартів для оцінювання їх ефективності обмежують можливості застосування штучного інтелекту в складних виробничих процесах.

Рекомендовано використовувати поетапну стратегію впровадження штучного інтелекту, що включає детальний аналіз виробничих процесів, тестування та адаптацію ШІ-моделей, інтеграцію гібридних алгоритмів та розподілених ШІ-рішень, що поєднують централізоване управління з

локальною автономністю. Окрему увагу слід приділити забезпеченню кібербезпеки, стандартизації методів аналізу даних і підготовленню персоналу для роботи з ІІІ-системами.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні методів адаптивного машинного навчання, створенні ІІІ-систем із підвищеною стійкістю до змінних середовищ, оптимізації взаємодії між автономними ІІІ-модулями та централізованими системами управління, а також розробленні нових підходів до оцінювання ефективності штучного інтелекту в автоматизованих промислових процесах.

Список бібліографічного опису:

1. Chyzhmar K., Dniprov O., Korotiuk O., Shapoval R., Sydorenko O. State Information Security as a Challenge of Information and Computer Technology Development. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. Vol. 9, No. 3. P. 819-828. DOI: [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3\(8\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3(8)) (date of access: 05.02.2025).
2. Чанкветадзе Д., Фешанич Л. Перспективи розвитку систем промислової автоматизації в контексті Індустрії 4.0. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. Вип. 4. С. 234–239. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-31> (дата звернення: 05.02.2025).
3. Круковська О., Кондрат О., Стрельченко Н. Інноваційні тенденції у логістиці: від автоматизації до штучного інтелекту. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2024. Вип. 6, № 24. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-94-105](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-94-105) (дата звернення: 05.02.2025).
4. Маєтний М. Огляд принципів роботи інтелектуальних систем управління у промисловості. *Актуальні питання у сучасній науці*. 2024. Вип. 12, № 30. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-12\(30\)-143-154](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-12(30)-143-154) (дата звернення: 05.02.2025).
5. Ніконенко У., Мандзіновський Ю. Гнучке управління на промисловому підприємстві через інтегрування технологій на базі штучного інтелекту: шляхи підвищення рівня економічної безпеки. *Наукові інновації та передові технології*. 2025. Вип. 1, № 41. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-1\(41\)-260-268](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-1(41)-260-268) (дата звернення: 05.02.2025).
6. Wang J., et al. Deep Learning for Smart Manufacturing: Methods and Applications. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018. Vol. 48. P. 144-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003> (date of access: 05.02.2025).
7. Lee J., et al. Industrial Artificial Intelligence for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*. 2018. Vol. 18. P. 20-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002> (date of access: 05.02.2025).
8. Lu Y., Xu X., Wang L. Smart Manufacturing Process and System Automation – A Critical Review of the Standards and Envisioned Scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. P. 312-325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010> (date of access: 05.02.2025).
9. Tyagi A.K., Fernandez T.F., Mishra S., Kumari S. Intelligent Automation Systems at the Core of Industry 4.0. In: Abraham A., Piuri V., Gandhi N., Siary P., Kaklauskas A., Madureira A. (eds) *Intelligent Systems Design and Applications*. ISDA 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, 2021. Vol. 1351. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71187-0_1 (date of access: 05.02.2025).
10. Yang T., Yi X., Lu S., Johansson K.H., Chai T. Intelligent Manufacturing for the Process Industry Driven by Industrial Artificial Intelligence. *Engineering*. 2021. Vol. 7, No. 9. P. 1224-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.023> (date of access: 05.02.2025).
11. Boina R., Achanta A., Mandvikar S. Integrating Data Engineering with Intelligent Process Automation for Business Efficiency. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2023. Vol. 12, No. 11. P. 1736-1740. URL: https://www.researchgate.net/publication/375952622_Integrating_Data_Engineering_with_Intelligent_Process_Automation_for_Business_Efficiency (date of access: 05.02.2025).
12. Peres R. S., Jia X., Lee J., Sun K., Colombo A. W., Barata J. Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 220121-220139. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874> (date of access: 05.02.2025).
13. Windmann A., Wittenberg P., Schieseck M., Niggemann O. Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Review of Integration Challenges for Industrial Systems. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2405.18580. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.18580> (date of access: 05.02.2025).
14. Ajiga D., et al. The Role of Software Automation in Improving Industrial Operations and Efficiency. *International Journal of Engineering Research Updates*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 22-35. URL: https://www.researchgate.net/publication/383410390_The_role_of_software_automation_in_improving_industrial_operations_and_efficiency (date of access: 05.02.2025).
15. Building a business that capitalises on digital opportunities. ArcelorMittal: official website, 2024. URL: <https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/building-a-business-that-capitalises-on-digital-opportunities/> (date of access: 21.01.2025)
16. AI-Powered Quality Control in BMW Group Production. BMW Group: official website, 2024. URL: <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2023/aiqx.html> (date of access: 21.01.2025).
17. Advanced Analytics. DHL: official website, 2024. URL: <https://www.dhl.com/us-en/home/innovation-in-logistics/logistics-trend-radar/advanced-analytics.html> (date of access: 21.01.2025)
18. Artificial Intelligence. BASF: official website, 2024. URL: <https://agriculture.basf.com/global/en/innovations-for-agriculture/trends-in-agriculture/artificial-intelligence> (date of access: 21.01.2025)
19. Artificial Intelligence for nature-based solutions. Shell Global: official website, 2024. URL: <https://www.shell.com/what-we-do/digitalisation/artificial-intelligence/artificial-intelligence-for-nature-based-solutions.html> (date of access: 21.01.2025)

20. Artificial Intelligence in industry. Siemens: official website, 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/artificial-intelligence-in-industry.html> (date of access: 21.01.2025).

References:

1. Chyzhmar, K., Dnipro, O., Korotiuk, O., Shapoval, R., & Sydorenko, O. (2020). State information security as a challenge of information and computer technology development. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 9(3), 819-828. DOI: [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3\(8\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3(8)).
2. Chankvetadze, D., & Feshanych, L. (2023). Perspektyvy rozvytku system promyslovoi avtomatyzatsii v konteksti Industrii 4.0 [Prospects for the development of industrial automation systems in the context of Industry 4.0]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – Measuring and Computing Technology in Technological Processes*, 4, 234–239. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-31> [in Ukrainian].
3. Krukovska, O., Kondrat, O., & Strelchenko, N. (2024). Innovatsiini tendentsii u lohistytsi: vid avtomatyzatsii do shtuchnoho intelektu [Innovative trends in logistics: from automation to artificial intelligence]. *Aktualni pytannia u suchasni nauki – Current Issues in Modern Science*, 6(24). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6\(24\)-94-105](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-6(24)-94-105) [in Ukrainian].
4. Maietnyi, M. (2024). Ohliad pryntsyviv roboty intelektualnykh system upravlinnia u promyslovosti [Review of principles of operation of intelligent control systems in industry]. *Aktualni pytannia u suchasni nauki – Current Issues in Modern Science*, 12(30). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-12\(30\)-143-154](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2024-12(30)-143-154) [in Ukrainian].
5. Нікопєнко, У., & Мандзиновський, Ю. (2025). Hnuchke upravlinnia na promyslovomu pidpriemstvi cherez intehruvannia tekhnolohii na bazi shtuchnoho intelektu: shliakhy pidvyshchennia rivnia ekonomichnoi bezpeky [Flexible management at an industrial enterprise through the integration of artificial intelligence-based technologies: ways to increase economic security]. *Naukovi innovatsii ta peredovi tekhnolohii – Scientific Innovations and Advanced Technologies*, 1(41). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-1\(41\)-260-268](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-1(41)-260-268) [in Ukrainian].
6. Wang, J., et al. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 144-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>.
7. Lee, J., et al. (2018). Industrial artificial intelligence for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>.
8. Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312-325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010>.
9. Tyagi, A. K., Fernandez, T. F., Mishra, S., & Kumari, S. (2021). Intelligent automation systems at the core of Industry 4.0. In A. Abraham, V. Piuri, N. Gandhi, P. Siarry, A. Kaklauskas, & A. Madureira (Eds.), *Intelligent Systems Design and Applications. ISDA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1351. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71187-0_1.
10. Yang, T., Yi, X., Lu, S., Johansson, K. H., & Chai, T. (2021). Intelligent manufacturing for the process industry driven by industrial artificial intelligence. *Engineering*, 7(9), 1224-1230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.023>.
11. Boina, R., Achanta, A., & Mandvikar, S. (2023). Integrating data engineering with intelligent process automation for business efficiency. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 12(11), 1736-1740. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/375952622_Integrating_Data_Engineering_with_Intelligent_Process_Automation_for_Business_Efficiency.
12. Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., & Barata, J. (2020). Industrial artificial intelligence in Industry 4.0 - Systematic review, challenges and outlook. *IEEE Access*, 8, 220121-220139. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>.
13. Windmann, A., Wittenberg, P., Schieseck, M., & Niggemann, O. (2024). Artificial intelligence in Industry 4.0: A review of integration challenges for industrial systems. *arXiv preprint*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.18580>.
14. Ajiga, D., et al. (2024). The role of software automation in improving industrial operations and efficiency. *International Journal of Engineering Research Updates*, 7(1), 22-35. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/383410390_The_role_of_software_automation_in_improving_industrial_operations_and_efficiency.
15. ArcelorMittal. (2024). Building a business that capitalises on digital opportunities. *ArcelorMittal: official website*. Retrieved from <https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/building-a-business-that-capitalises-on-digital-opportunities/>.
16. BMW Group. (2024). AI-powered quality control in BMW Group production. *BMW Group: official website*. Retrieved from <https://www.bmwgroup.com/en/news/general/2023/aiqx.html>.
17. DHL. (2024). Advanced analytics. *DHL: official website*. Retrieved from <https://www.dhl.com/us-en/home/innovation-in-logistics/logistics-trend-radar/advanced-analytics.html>.
18. BASF. (2024). Artificial intelligence. *BASF: official website*. Retrieved from <https://agriculture.basf.com/global/en/innovations-for-agriculture/trends-in-agriculture/artificial-intelligence>.
19. Shell Global. (2024). Artificial intelligence for nature-based solutions. *Shell Global: official website*. Retrieved from <https://www.shell.com/what-we-do/digitalisation/artificial-intelligence/artificial-intelligence-for-nature-based-solutions.html>.
20. Siemens. (2024). Artificial intelligence in industry. *Siemens: official website*. Retrieved from <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/topic-areas/artificial-intelligence-in-industry.html>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-03>

УДК 004.031.4, 004.622, 004.514

Савка Яна Степанівна, студентка магістратури

Ковівчак Ярослав Васильович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-3562-4924>

Дубук Василь Іванович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6339-1032>

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ДІЯЛЬНОСТІ МОЛОДІЖНОГО ЦЕНТРУ

Савка Я.С., Ковівчак Я.В., Дубук В.І. Розробка автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру. У статті розглянуто проектування і розробку автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру. Обґрунтовано актуальність розробки системи. Проведено аналіз існуючих подібних систем, а також розглянуто їх переваги і недоліки. Приведено концептуальну модель автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру. Побудовано діаграми прецедентів для користувачів системи. Розроблено блок-схеми алгоритмів роботи системи. Побудовано функціональну модель системи з різними рівнями її деталізації. Розроблено діаграму класів та базу даних системи. Виконано реалізацію компонентів системи, бази даних та інтерфейсу користувача, а також проведено їх тестування. Розроблена автоматизована система підтримки діяльності молодіжного центру може знайти успішне застосування у діяльності молодіжних центрів різного спрямування та інших громадських організацій України та світу.

Ключові слова: автоматизована система, підготовка даних, молодіжні організації, громадські організації, автоматизація діяльності.

Savka Ya., Kovivchak Ya., Dubuk V. Development of an automated system to support the activities of a youth centre. The article considers the design and development of an automated system for supporting the activities of a youth centre. The relevance of developing the system is substantiated. An analysis of existing similar systems is carried out, and their advantages and disadvantages are considered. A conceptual model of an automated system for supporting the activities of a youth centre is presented. Use-case diagrams for the users of the system are constructed. Block diagrams of the system's operation algorithms are developed. A functional model of the system is constructed with different levels of its detailing. A class diagram and the system database are developed. The development of the system components, database and user interface carried out, and their testing were conducted. The developed automated system for supporting the activities of a youth centre can be successfully applied to the needs of youth centres of various directions and other public organizations of Ukraine and worldwide.

Keywords: automated system, data preparation, youth organizations, public organizations, automation of activities.

Постановка задачі. З розвитком комп'ютерних технологій все більше громадських організацій різного призначення застосовують сучасні інформаційні системи (ІС) з метою полегшення та підвищення ефективності їхньої діяльності. Такі системи дають змогу покращувати рівень комунікації між користувачами, оптимізувати діяльність організацій.

Для будь-якої територіальної громади і її перспектив у майбутньому важливе значення має наявність можливості самореалізації для молодого покоління. З цією метою у територіальних громадах створюються та функціонують молодіжні центри [1]. З кожним роком кількість молодіжних центрів в Україні зростає та держава в особі Уряду України сприяє та підтримує їх діяльність [4, 6], яка націлена на професійний, культурний, інтелектуальний і соціальний розвиток молоді в межах територіальних громад [2]. Такі центри залучають молодь до виконання професійних, освітніх, творчих і соціальних проєктів [3]. Це заохочує молодь до активної участі в суспільному житті територіальної громади. Молодіжні центри допомагають молодому поколінню набувати певного досвіду, навиків командної роботи, здійснювати обмін думками і досвідом, а також підвищують соціальну активність молоді [9]. Тому розробка автоматизованих систем підтримки діяльності молодіжних центрів різної спеціалізації для територіальних громад, є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було проведено аналіз існуючих інформаційних систем, які націлені на підтримку роботи молодіжних центрів. До найбільш відомих і вживаних з них можна віднести ІС: Всеукраїнський молодіжний центр [5], Молодіжна Платформа (Youth Platforma) [7] та Молодіжний центр "Paragraph" [8].

ІС Всеукраїнського молодіжного центру була створена групою розробників demch.co. На рис. 1 приведено головну сторінку інтерфейсу ІС Всеукраїнського молодіжного центру [5]. Ця ІС надає допомогу при створенні нових регіональних молодіжних центрів і оптимізації роботи вже існуючих. Її основними користувачами можуть бути працівники молодіжних організацій, молоді люди віком

від 14 до 35 років, а також молодіжні організації та установи [5].

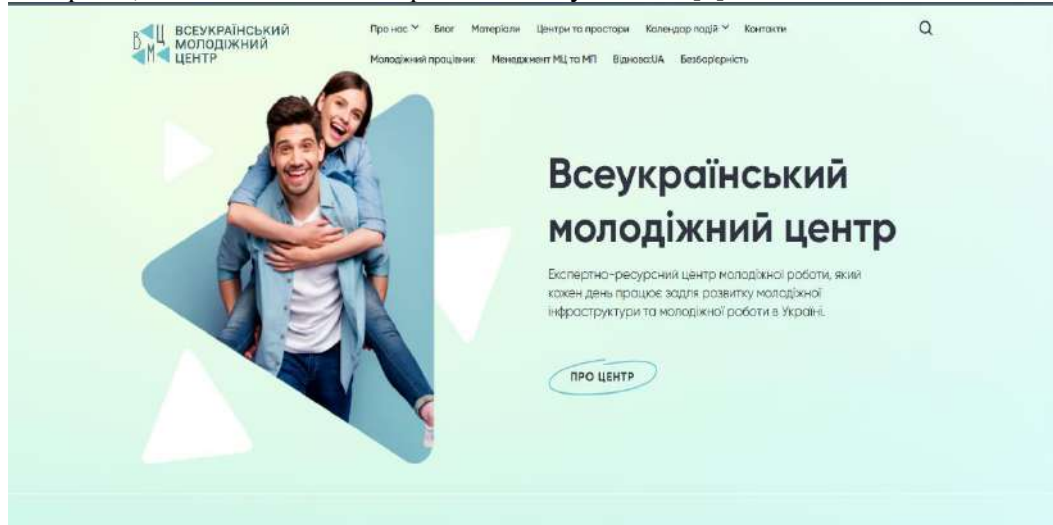


Рис. 1 – Головна сторінка інтерфейсу ІС Всеукраїнського молодіжного центру

До переваг ІС можна віднести: чітку і логічну структуру програмної підсистеми; мінімалістичний дизайн, простий у використанні. Недоліки: відсутність мобільної версії інтерфейсу ІС; містить багато статистичної інформації.

Інформаційна система Молодіжна Платформа (Youth Platforma, рис. 2) розроблена з метою підтримки розвитку молодіжної політики в Україні [7]. Понад 10 років за допомогою цієї платформи створюються і розвиваються молодіжні центри у Волинській області України.

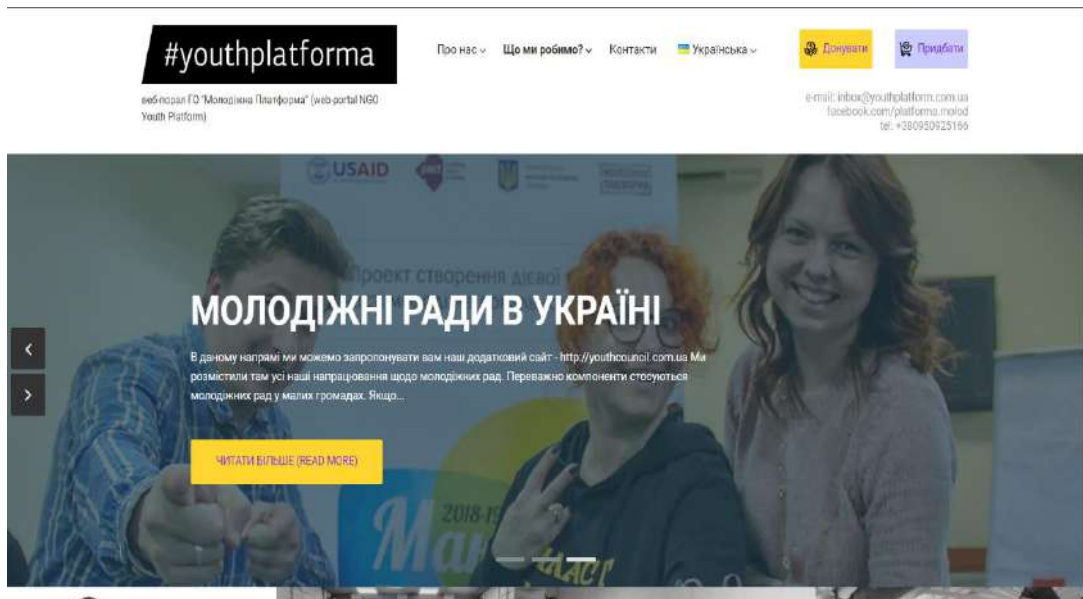


Рис. 2 – Головна сторінка інтерфейсу ІС Молодіжної Платформи

До переваг цієї платформи можна віднести: вибір мови (українська, англійська); швидкість роботи; дружній інтерфейс. Недоліки: відсутність мобільної версії.

Інформаційна система для молодіжного центру "Paragraph" [8] була розроблена студентами Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника. За допомогою цієї ІС можна організувати неформальну і громадську освіту та різні події, що сприяють організації інтелектуального, культурного дозвілля і духовному розвитку молоді. Головна сторінка інтерфейсу ІС молодіжного центру "Paragraph" приведена на рис. 3 [8].

До переваг відповідної ІС можна віднести: зручний та інтуїтивний інтерфейс; можливість вибору мови інтерфейсу; оригінальний дизайн. Недоліки: не передбачено авторизацію користувачів; відсутня можливість онлайн-реєстрації на ті чи інші події.

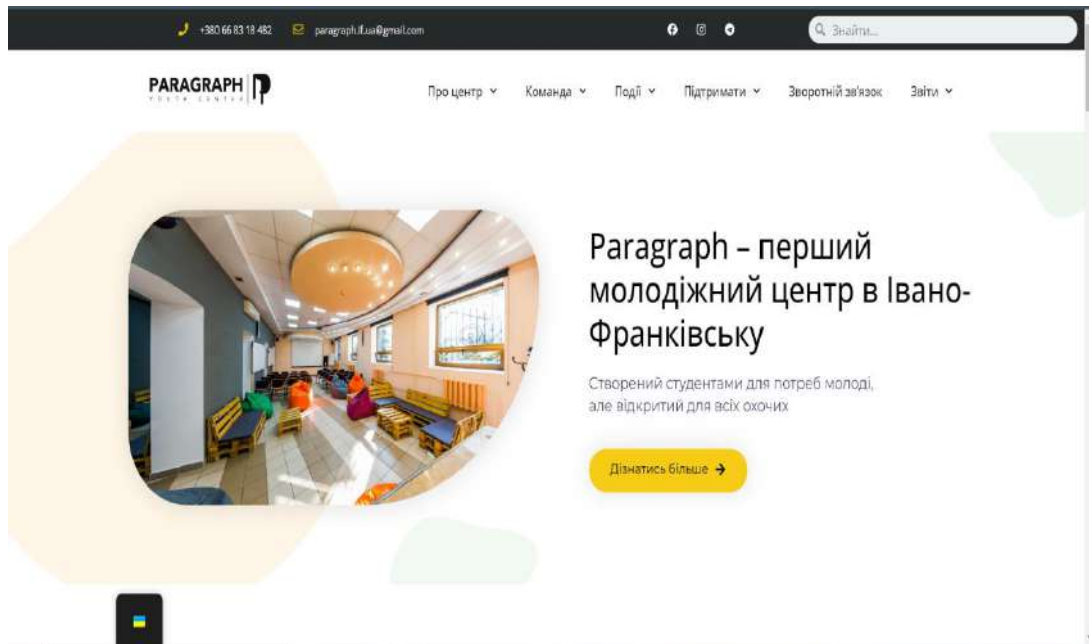


Рис. 3 – Головна сторінка молодіжного центру "Paragraph"

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру.

Основна частина. Для кращої організації командної роботи над складовими проекту системи було використано інструмент Figma [10]. Як перший результат, було розроблено концептуальну модель автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру з урахуванням рекомендацій [11] та [12]. Вона приведена на рис. 4.



Рис. 4 – Концептуальна модель автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру

У найбільш широкому варіанті користувачами системи (тобто, її зовнішніми сутностями) можуть бути: засновники центру; керівники центру; працівники центру; заохочена молодь та мешканці громади, селища. Запити, які будуть здійснювати вказані вище користувачі, визначають основну множину функцій системи.

Приклади різних видів діаграм UML, що розглядалися при проектуванні системи докладно описані у публікації [13]. При їх побудові було використано інструментальний засіб Draw.io [14].

Також було розроблено діаграми випадків використання для всіх сутностей системи з

використанням рекомендацій, наведених у [12, с.283-284].

Як приклад, наведемо діаграму випадків використання для працівників центру (рис. 5).

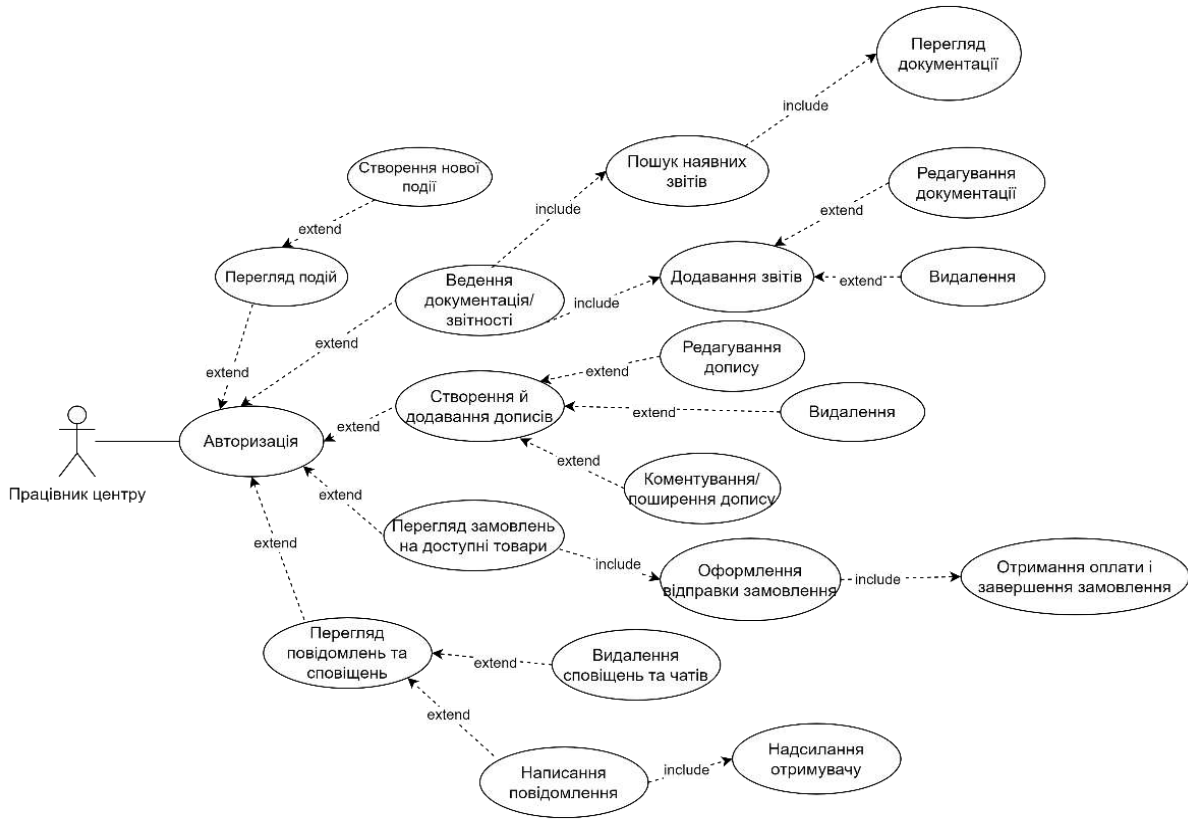


Рис. 5 – Діаграма випадків використання для користувача “Працівник центру”

На приведеній діаграмі подано набір основних прецедентів (функцій), які будуть доступні для виконання працівникам центру підтримки діяльності молоді.

Під час проектування автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру розроблено необхідний комплекс алгоритмів реалізації функцій системи у відповідності до виконання запитів користувачів з урахуванням рекомендацій [15]. Блок-схема алгоритму створення повідомлення приведена на рис. 6.

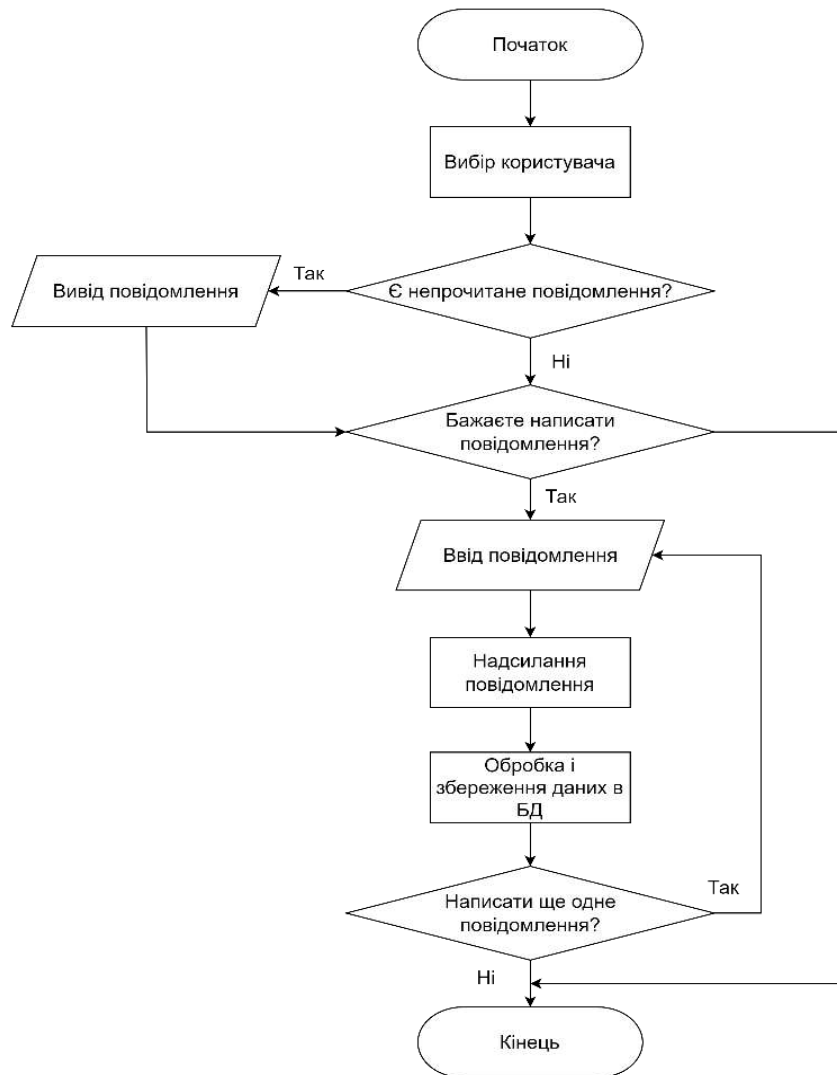


Рис. 6 – Блок-схема алгоритму створення повідомлення в ІС

Побудована блок-схема відображає послідовність дій при створенні повідомлень, за допомогою яких здійснюється обмін інформацією між користувачами системи.

Крім того, розроблено функціональну модель системи з відповідними рівнями її деталізації. На рис. 7 зображено контекстну діаграму функціональної моделі системи, а на рис. 8 -діаграму її декомпозиції першого рівня.

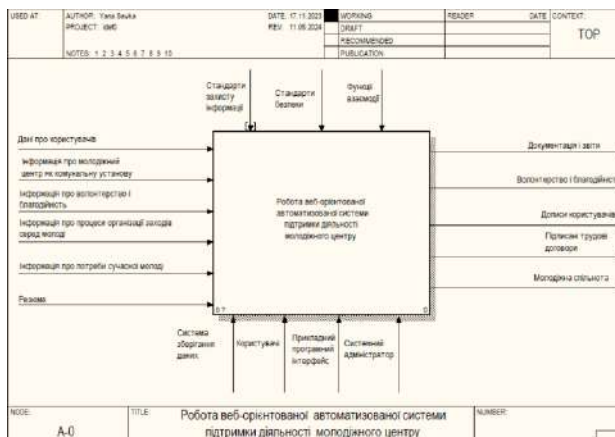


Рис. 7 – Контекстна діаграма автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного

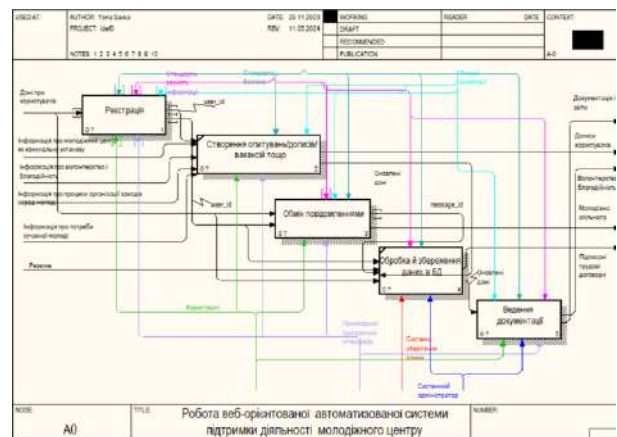


Рис. 8 – Діаграма декомпозиції функціональної моделі системи першого рівня

центру

Протягом проектування системи здійснено розробку бази даних та діаграми компонентів ІС. При розробці діаграми компонентів було враховано рекомендації, наведені у [16]. Діаграма компонентів ІС приведена на рис. 9. На ній зображено структуру системи із необхідними зв'язками між основними компонентами. База даних побудована у відповідності до предметної області, набору зовнішніх сутностей та функцій системи. Для розробки бази даних використано реляційну модель.

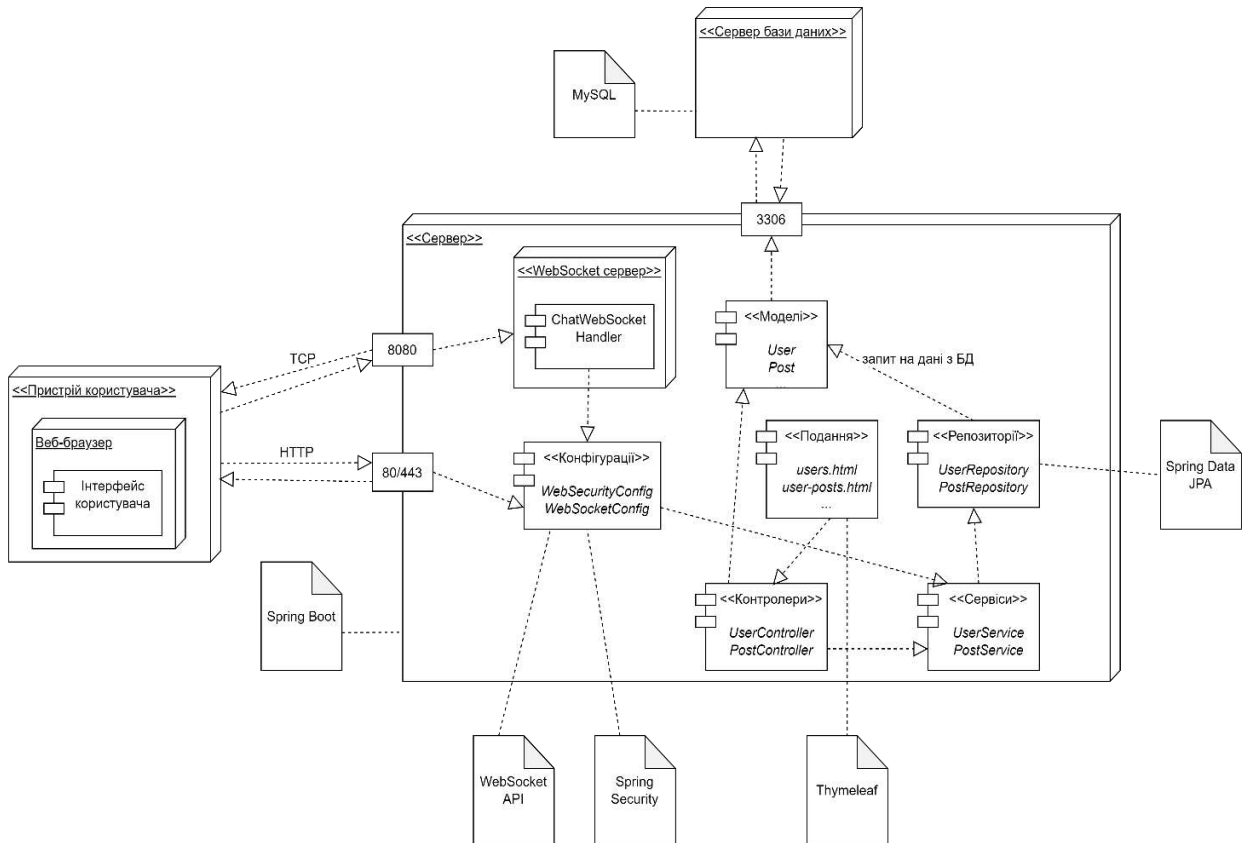


Рис. 9 – Діаграма компонентів автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру

При розробці компонентів ІС було використано стек інформаційно-технологічних засобів: мову HTML [17], технології JSP [18], JavaScript [19], інструментальні середовища IntelliJ IDEA [20] та Spring [21].

Також було розроблено інтерфейси для всіх зовнішніх сутностей автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру.

Як приклад, на рис. 10 наведено інтерфейс форми створення проекту для користувачів автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру.

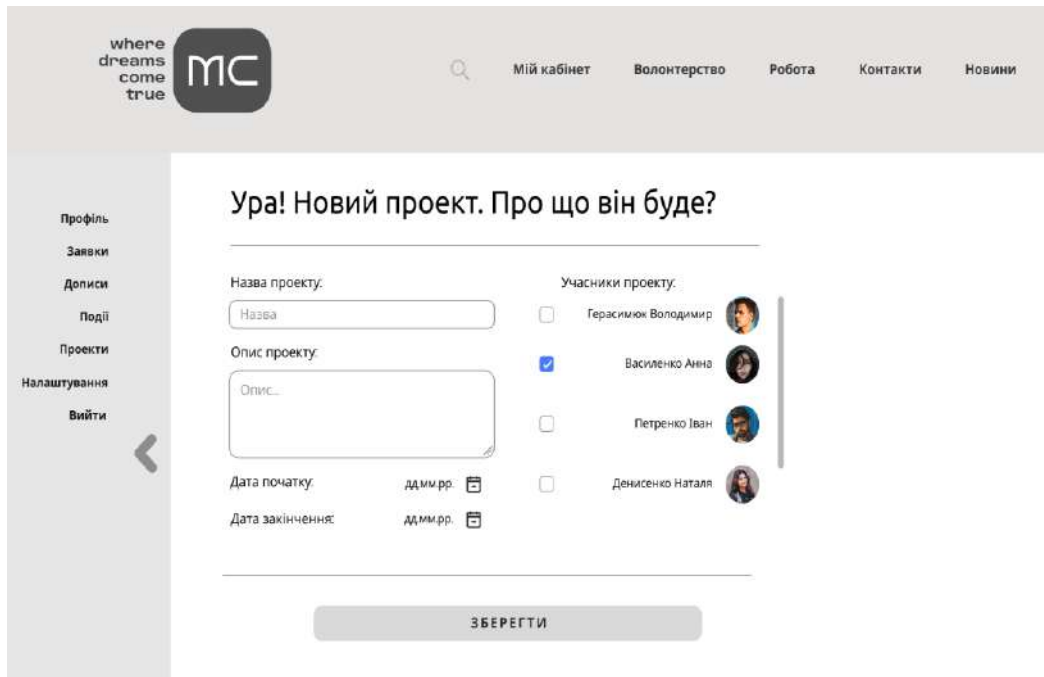


Рис. 10 – Інтерфейс форми створення проекту автоматизованої системи підтримки діяльності молодіжного центру

В результаті розробки системи здійснено реалізацію всіх компонентів системи, бази даних та інтерфейсів користувачів, а також проведено їх тестування.

Висновки. Як результат роботи, розроблено автоматизовану систему підтримки діяльності молодіжного центру. Розроблену систему можна буде успішно використовувати для формування молодіжних центрів у різних територіальних громадах, містах і селищах. Застосування розробленої системи буде сприяти професійному, культурному, інтелектуальному та соціальному розвитку молоді в межах територіальних громад.

Список бібліографічного опису

1. Коротка історія молодіжних центрів. Youth worker. Молодіжний працівник. Навчальна програма «Молодіжний працівник». 2025. URL: <https://youth-worker.org.ua/uncategorized/kortka-istoriya-molodizhnyh-czentriv/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
2. Докієн О. «Резиденція молоді». Що таке Молодіжний центр і для чого він потрібен Чернівцям. Шпальта. Шпальта медіа. 2018. URL: <https://shpalta.media/2018/10/12/rezidenciya-molodi-shho-take-molodizhnij-centr-i-dlya-chogo-vin-potriben-cherniv-cyam/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
3. КУ "Молодіжний центр" 44981530. COMMUNAL INSTITUTION YOUTH CENTER (YOUTH CENTER). YOUCONTROL. 2025. URL: https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/44981530/ (дата звернення: 14.02.2025 р.)
4. Про затвердження типових положень про молодіжний центр та про експертну раду при молодіжному центрі : Постанова Каб. Міністрів України № 1014 від 20.12.2017. Офіційний вісник України. 2018. № 3. С. 25. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1014-2017-%D0%BF#Text> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
5. Всеукраїнський молодіжний центр. Всеукраїнський молодіжний центр. 2024. URL: <https://auyc.org.ua/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
6. ВідНОВА:UA, Програма залучення молоді до відновлення України шляхом реалізації молодіжних обмінів. ВідНОВА:UA. 2025. URL: <https://vidnova.org.ua/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
7. Громадська організація "Молодіжна платформа". Творимо молодіжні центри та молодіжні ради в Україні. Молодіжна Платформа. 2025. URL: <https://youthplatform.com.ua/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
8. Paragraph – перший молодіжний центр в Івано-Франківську. Молодіжний центр Paragraph. 2025. URL: <https://paragraph.if.ua/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
9. Хочеш приєднатися або допомогти? Асоціація Молодіжних центрів України. 2025. URL: <https://youthcenters.net.ua/> (дата звернення: 14.02.2025 р.)
10. Think bigger. Build faster. Figma helps design and development teams build great products, together. Figma. 2025. URL: <https://www.figma.com/> (date of access: 14.02.2025).
11. Johnson J., Henderson A. Conceptual models: begin by designing what to design. Interactions. Vol.9, No.1 (January 2002), 25–32. URL: <https://doi.org/10.1145/503355.503366> (date of access: 15.02.2025).
12. Томашевський О.М., Цегелик Г. Г., Вітер М.Б., Дубук В.І. Інформаційні технології та моделювання бізнес-процесів. Навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2023. 296 с. URL: <https://cul.com.ua/informacijni-tehnologiyi-ta-modelyuvannya-biznes-procesiv> (дата звернення: 15.02.2025 р.)

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-04>

UDC 621.67.05:519.872

Bautina Maryna, master

<https://orcid.org/0009-0002-9617-9262>

SoftServe, Lviv, Ukraine

RELIABILITY ASSESSMENT AND FAILURE PREDICTION OF SUBMERSIBLE PUMPS USING ADVANCED MODELING TECHNIQUES

Bautina M. Reliability Assessment and Failure Prediction of Submersible Pumps Using Advanced Modeling Techniques. The article examines modern approaches to predictive maintenance of submersible pumps using artificial intelligence algorithms and IoT sensors. The study's relevance is determined by the need to improve the reliability of pump equipment and optimize maintenance costs. It has been established that the main challenges include high infrastructure modernization costs, the complexity of adapting algorithms to variable data streams, and the need for qualified personnel to operate the monitoring system. The study's purpose is to develop recommendations for integrating predictive maintenance systems to reduce unplanned downtime and optimize maintenance costs. The article employs methods of comparative analysis of predictive model efficiency and investigates the impact of key parameters, such as pressure, temperature, and vibration, on real-time equipment condition prediction. The results demonstrated that the proposed model based on recurrent neural networks outperforms traditional approaches across all key metrics, particularly regarding precision and recall. The study concludes that a phased implementation of pilot projects is necessary to adapt the system to industrial conditions and ensure continuous monitoring. The prospects for further research include the development of adaptive models capable of working with incomplete data and enhancing the autonomy of maintenance systems through self-learning algorithms, which will contribute to the stable operation of pump systems under complex operating conditions.

Keywords: predictive maintenance, submersible pump analysis, advanced modeling, failure diagnostics, reliability engineering.

Баутіна М.В. Оцінка надійності та прогнозування відмов заглибних насосів за допомогою передових методів моделювання. У статті досліджено сучасні підходи до прогнозування обслуговування заглибних насосів із використанням алгоритмів штучного інтелекту та IoT-сенсорів. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності насосного обладнання та оптимізації витрат на його технічне обслуговування. Встановлено, що основними проблемами є високі витрати на модернізацію інфраструктури, складність адаптації алгоритмів до змінних потоків даних та потреба у кваліфікованому персоналі для роботи із системою моніторингу. Метою дослідження є розробка рекомендацій щодо інтеграції систем прогнозування обслуговування для зниження кількості аварійних простоїв і оптимізації витрат на обслуговування. У статті використано методи порівняльного аналізу ефективності моделей прогнозування, а також дослідження впливу змін ключових параметрів, таких як тиск, температура та вібрація, на прогнозування технічного стану насосів у реальному часі. Результати показали, що запропонована модель на основі рекурентних нейронних мереж перевершує традиційні підходи за всіма ключовими показниками, зокрема за точністю та повнотою. Зроблено висновок про необхідність поетапного впровадження пілотних проєктів для адаптації системи до виробничих умов і забезпечення безперервного моніторингу. Перспективи подальших досліджень включають розробку адаптивних моделей для роботи з неповними даними, а також підвищення автономності систем обслуговування через самонавчання моделей. Це сприятиме стабільній роботі насосних систем у складних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: прогнозує обслуговування, аналіз заглибних насосів, передове моделювання, діагностика відмов, інженерія надійності.

Problem statement. In modern industrial systems, submersible pumps play a key role in ensuring the continuity of technological processes, but their failure can lead to significant financial losses and business interruptions. Traditional maintenance approaches based on fixed inspection intervals are often ineffective because they do not consider the dynamics of changes in operating parameters and early warning signs. This creates the need to implement innovative predictive maintenance systems that promptly predict possible failures and prevent emergencies.

Integrating artificial intelligence algorithms and IoT sensors opens up new opportunities for real-time monitoring and diagnosing submersible pump conditions. High-precision machine learning algorithms allow for analyzing large amounts of sensor data and identifying hidden patterns that signal potential equipment failures. Using metrics such as precision, recall, F1-measure, and root mean square error allows you to evaluate the effectiveness of models and adjust them to achieve greater accuracy of predictions in specific operating conditions. Custom algorithm modifications can be used to improve the efficiency of forecasts, considering the peculiarities of pump operation, load fluctuations, and possible delays in data transmission from IoT sensors.

The practical significance of such research lies in creating effective systems for automated forecasting of equipment technical conditions. This minimizes downtime, reduces the cost of unscheduled repairs, and increases the overall productivity of production processes. This provides business benefits in

the form of increased resource management efficiency, reduced accident risks, and an adaptive maintenance strategy based on real-world data on equipment conditions.

Analysis of the latest research and publications. Assessing the reliability and predicting failures of submersible pumps is one of the key issues in ensuring the smooth operation of pumping stations. Modern research is focused on the implementation of machine learning algorithms and the use of IoT sensors to analyze the technical condition of equipment and improve the efficiency of its maintenance. The study of methods for predicting failures of electric submersible pumps demonstrate the prospects of using modern approaches based on artificial intelligence. In, R. Abdalla, H. Samara, N. Perozo, C. Paz Carvajal, and P. Jaeger proved that the use of machine learning can reduce the number of emergency shutdowns through effective real-time anomaly analysis [1]. S. Almazrouei, F. Dweiri, R. Aydin, et al. reviewed existing models for predictive pump maintenance and emphasized the need to standardize methods for processing large amounts of streaming data [2].

An important area of research is the use of multimodal methods and transfer learning for real-time fault diagnosis. P. Yang, J. Chen, L. Wu, and S. Li proposed an approach based on the integration of different types of learning that improves the accuracy of predictions in variable conditions [3]. P. Bhattacharjee applied the method of multinomial logistic regression to quantify the risk of pump component failures, which minimizes false signals of the diagnostic system [4].

Deep learning models also demonstrate a high level of efficiency in forecasting. J. Chen, W. Li, P. Yang, S. Li, and B. Chen developed a three-stage diagnostic model that combines deep learning and support vector machine methods and demonstrates a high level of accuracy [5]. The study by S. Saptadi, A. Widodo, M. F. Athaillah, and M. F. Ayyasyi presented the use of recurrent neural networks, which provided a prediction accuracy of more than 90% [6].

The study of pump failure mechanisms requires the development of additional measures to minimize failures. The paper by S. Fagher, A. Khlaifat, and M.E. Hossain provides an overview of the causes of failures of electric submersible pumps and suggests ways to prevent them [7]. Hybrid models combining physical parameters and machine learning algorithms are promising for improving diagnostic accuracy. S. Al-Ballam, H. Karami, and D. Devegowda proposed a hybrid model for real-time fault prediction [8].

A separate area of research concerns the impact of design parameters on pump reliability. In the work of V. Kannaujia, S. P. Bhore and H. S. Goyal analyzed the factors affecting the performance of pumping equipment and emphasized the importance of standardizing experimental modeling methods [9].

An in-depth analysis of the practical aspects of pump maintenance is presented in the monograph by G. Takacs, which discusses the technical characteristics, operating modes and measures to improve the reliability of pumping units [10].

Promising approaches to the diagnosis of hydraulic pumps are considered in the study by Y. Yang, L. Ding, J. Xiao, G. Fang, and J. Li, where the use of artificial intelligence for real-time signal processing can significantly improve the accuracy of forecasting [11]. Methods of adaptive adjustment of forecasting systems are presented in the article by Q. Li, K. Li, X. Gao, J. Fu, and L. Zhang, who proposed temporal attention networks to improve the accuracy of anomaly detection [12].

Intelligent systems for diagnosing malfunctions of drilling pumps were studied by J. Guo, Y. Yang, H. Li, L. Dai, and B. Huang, who described a parallel neural network architecture that can be adapted for electric submersible pumps [13]. A deep belief network methodology for predicting the operating modes of pumping units was proposed by D. Yu and H. Zhang [14]. The use of machine learning algorithms to improve the accuracy of predicting pumping station modes was investigated by O. Turchyn [15].

Thus, the analysis confirms that the prospects for research are related to the development of adaptive algorithms and hybrid models to improve the reliability and autonomy of predictive maintenance systems.

Highlighting previously unsolved parts of the problem. Despite significant advances in predicting the technical condition of pumps, aspects still require further research. First, the effectiveness of artificial intelligence algorithms in the face of variable and incomplete streaming data, critical for real-time systems, has not been sufficiently studied. Data loss or noise signals can affect the quality of forecasting and increase the number of false positives.

Second, the optimal set of IoT sensors and their configuration must be determined to improve diagnostic accuracy. The lack of empirical research on the combination of several types of sensors limits the ability to adapt systems to different operating environments.

Thirdly, the issue of creating models capable of automatic retraining without losing efficiency remains relevant. Most modern methods require manual intervention to adjust models to changing conditions, which reduces data processing efficiency.

The proposed study aims to overcome these limitations by developing adaptive algorithms for dealing with unstable data, conducting a comprehensive assessment of forecast effectiveness, and developing practical recommendations for the passed integration of systems into business processes to reduce downtime and optimize maintenance.

The purpose of the article is to develop an effective approach to assessing the reliability and predicting failures of submersible pumps using artificial intelligence algorithms and IoT technologies to improve maintenance efficiency.

Objectives of the article:

1. To investigate modern artificial intelligence algorithms used to analyze and predict technical failures, determine their suitability for monitoring the condition of submersible pumps, and establish key parameters of IoT sensors with an assessment of their role in modeling the behavior of pumping equipment.
2. To propose a modified methodology for analyzing streaming data that takes into account the specifics of operating conditions and the characteristics of variable parameters and to conduct a comparative assessment of the effectiveness of this methodology based on key forecasting metrics such as precision, recall, F1-score, and root mean square error.
3. Provide practical recommendations for integrating IoT-based predictive maintenance systems and artificial intelligence algorithms into business processes to minimize downtime and reduce maintenance costs.

Summary of the primary material. Using artificial intelligence algorithms in equipment maintenance allows for the prompt prediction of failures and detection of malfunctions. Machine learning algorithms are particularly effective in monitoring the condition of submersible pumps, as they can process large amounts of streaming data and identify hidden patterns in changes in key equipment parameters. The choice of algorithms largely depends on the type of task: logistic regression algorithms, support vector machines, and decision trees are used to classify system states, while recurrent neural networks and gradient boosting methods are effective for predicting the remaining service life. In modern industrial systems, submersible pumps can operate under conditions of uneven loads and changes in external factors, which requires the adaptability of algorithms and the ability to work with incomplete data and anomalies (Table 1).

Table 1 – Artificial intelligence algorithms for monitoring the condition of submersible pumps: purpose and application features

Artificial intelligence algorithm	Appointment	Application features for monitoring submersible pumps
Logistic regression	Classification of states ("good"/ "possible failure")	A simple algorithm for working with a small number of parameters, but has limitations in complex multidimensional systems.
Support vector machine (SVM)	Detecting boundary values between classes	It is effective when working with non-linear data, but may require significant computing resources for large datasets.
Decision trees and gradient boosting	Failure prediction and probability estimation	Provide a high level of interpretability of results, especially useful for working with mixed data types.
Recurrent neural networks (RNN, LSTM)	Predicting time to failure	They are able to work with consistent data and take into account historical dependencies, but require considerable training time.

Source: compiled by the author based on [2; 4; 5; 7; 9; 12].

In practice, logistic regression is used to assess equipment condition and identify initial risks. It is effective in cases where the amount of data is relatively small, and the system parameters are stable. For more complex tasks that involve analyzing fluctuations in pump operation in real-time, support vector methods are used to identify critical changes in equipment operation even in the presence of abnormal values. Gradient boosting and decision trees are widely used to build risk assessment models and predict time to failure, as they balance forecast accuracy with the explainability of the results.

Recurrent neural networks show high efficiency in systems where it is necessary to analyze long-time series, for example, to determine changes in pressure or vibration of pumps in long-term operation mode [6]. Their implementation is possible in industrial enterprises where IoT sensors with a high data collection frequency are installed. For example, in the case of pump monitoring at large production

facilities, RNN systems can predict potential failures several days before they occur, allowing maintenance planning without stopping the main processes. Using such algorithms in combination with IoT technologies ensures an increase in safety, a reduction in the cost of emergency repairs, and the formation of a maintenance strategy based on data on the actual condition of the equipment [14].

Integrating IoT sensors into submersible pump monitoring systems allows for the continuous collection of a large amount of data reflecting the dynamics of equipment operation. The main parameters monitored by the sensors include pressure, temperature, vibration level, power consumption, and fluid flow. These parameters are key indicators of pump health and can signal early warning signs of malfunctions, allowing artificial intelligence algorithms to model equipment behavior and predict potential failures. For the models to function effectively, it is important to ensure high accuracy and stability of sensor data reading, achieved by calibrating the equipment and using data transfer protocols with minimal delay (Table 2).

Table 2 – Main parameters of IoT sensors and their role in modeling the behavior of submersible pumps

IoT sensor parameter	Purpose in monitoring	Role in modeling the behavior of pumping equipment
Pressure	Detection of deviations from the normative level	Allows you to detect signs of blockage or performance degradation.
Temperature.	Heating control of working units	It is used to assess possible overheating that can cause damage.
Vibration level	Detection of mechanical defects	It helps to identify imbalances, bearing wear, or other mechanical problems.
Electricity consumption	Analysis of pump efficiency	A decrease or increase in energy consumption signals problems in the system's functioning.
Liquid flow rate	Determining system performance	It is used to assess the compliance of a flow rate with the declared technical characteristics.

Source: compiled by the author based on [3; 5; 7; 8; 12; 15].

The data obtained from IoT sensors form the basis for building mathematical models for predicting the behavior of pumping equipment and making informed maintenance decisions. Each parameter is crucial for diagnosing pump operation and identifying potential threats to its performance. In particular, pressure readings allow you to assess the hydrodynamic characteristics of the system and timely detect blockages or performance drops that may indicate a violation of the integrity of the channels or malfunctioning valves. The temperature of the working units is a critical parameter for monitoring the thermal regime since even a slight excess of the permissible values can cause gradual destruction of the pump's internal components and reduce its service life.

Vibration level monitoring provides diagnostics of mechanical defects, such as bearing imbalance or wear. This indicator is one of the most sensitive to changes in the operation of pumping equipment, as deviations from the normal level can result from even small changes in the geometry of working elements or the loosening of fasteners. Analyzing electricity consumption allows you to assess the pump's energy efficiency and detect deviations associated with an increase in load or a decrease in motor efficiency in a timely manner. Fluid flow rate, in turn, is a key parameter for assessing system performance and allows you to determine the actual volume of transported working medium compared to the nominal characteristics of the equipment.

In practice, combining data from different sensors provides a comprehensive picture of the submersible pump's operation, increasing the accuracy of prediction models and reducing false-positive alarms. For example, in production systems with a large volume of liquid handling, a prolonged temperature rise with normal vibration levels may indicate a blockage in the filter systems rather than a mechanical failure of the pump. Such monitoring systems are implemented at enterprises to minimize the risk of downtime and optimize maintenance costs, which ensures the stability of equipment operation and efficient use of resources.

To effectively predict the condition of submersible pumps in complex operating conditions, it is necessary to take into account the peculiarities of streaming data, which may be irregular, contain noise components, and deviations from the norm due to random events. Existing analysis methods are often based on static models that do not adapt to changing operating conditions, which reduces the accuracy of real-time predictions. The proposed modified methodology involves the integration of adaptive machine learning algorithms capable of processing large amounts of data in real-time and taking into account

dynamic changes in operating parameters. It is based on the use of recurrent neural networks (RNNs) and their modifications, such as LSTM and GRU, which allow information about previous system states to be stored, and behavior can be predicted based on historical dependencies.

Unlike traditional models based on average parameter values, the modified methodology focuses on predicting both pump failures as a binary phenomenon (failure/normal operation) and specific quantitative indicators such as pressure, temperature, vibration, and electricity consumption. This ensures clarity in the application of evaluation metrics: precision, recall, and F1-score for binary classification tasks, and MSE and MAE for regression tasks. For example, the average absolute value of the difference between forecasts and actual values (MAE) specifically refers to quantitative predictions like temperature or vibration levels, avoiding ambiguity in interpreting results.

The methodology involves a multi-level preprocessing stage to ensure the quality and reliability of input data. This includes handling missing data, applying Kalman filtering to reduce noise, and normalizing parameter values for consistent model training. These preprocessing steps are essential for addressing common issues in real-world IoT sensor streams, such as data gaps and noisy measurements, which could otherwise affect prediction accuracy (Table 3).

Figure 1 illustrates the historical vibration data of two submersible pumps collected over a 24-hour period. The graph demonstrates the fluctuations in vibration levels captured by IoT sensors, showcasing both short-term variations and consistent trends. This visualization highlights the variability in operational conditions and the importance of accounting for such fluctuations in predictive maintenance models.

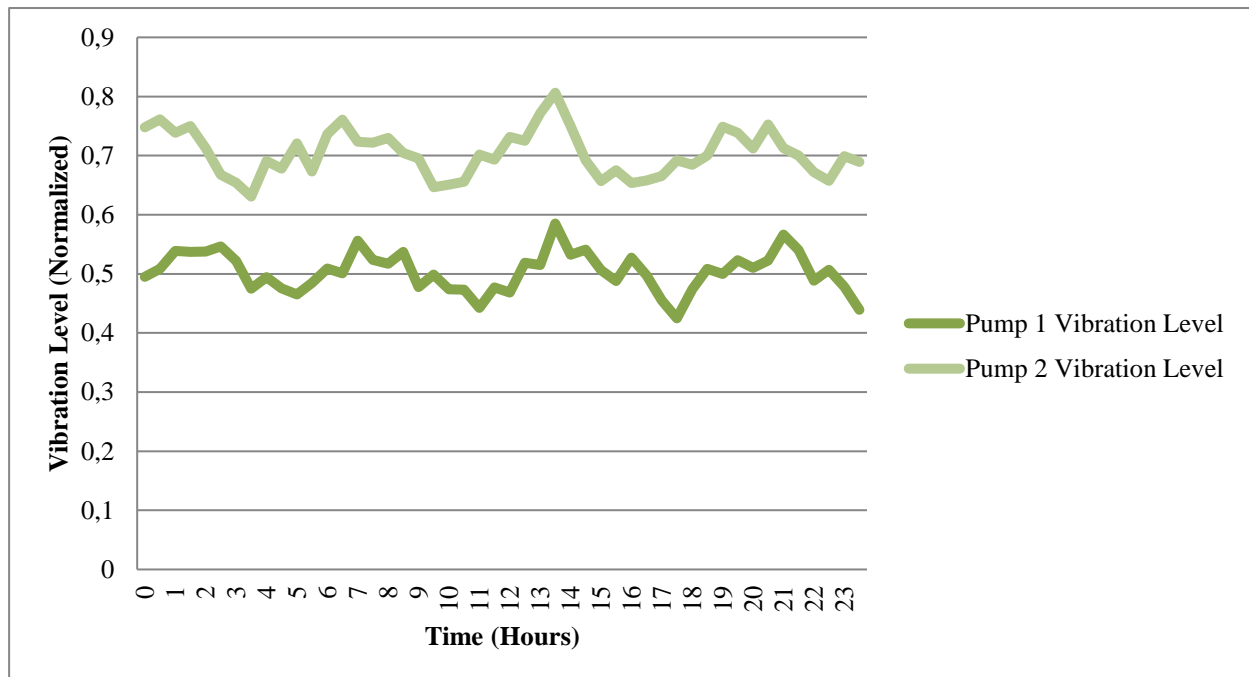


Fig. 1. Historical vibration data of submersible pumps

Source: author's own development

As shown in Figure 1, the vibration levels of both pumps exhibit periodic fluctuations due to normal operational dynamics, with Pump 2 displaying slightly higher baseline vibrations. The ability to analyze and predict such patterns allows the proposed model to distinguish between minor operational variations and critical deviations that could signal impending failures. By incorporating these historical trends into model training, the methodology ensures higher accuracy in predicting both pump failures and quantitative performance metrics.

Table 3 – Elements of a modified methodology for analyzing streaming data for monitoring submersible pumps

Element of the methodology	Description of functionality	Expected results of the application
Preliminary data filtering	Reducing noise and eliminating anomalous values	Increase the accuracy of system parameter analysis
Using modified RNNs (LSTM/GRU)	Forecasting based on time series	Improving forecasts by taking into account historical changes
Adaptive model training	Retraining based on new data	Increasing the relevance of the model in the face of change
Evaluation Using Targeted Metrics	Separate evaluation for predicting pump failures (F1-score, Recall) and pump parameters (MSE, MAE)	Objective assessment of forecast quality in real time

Source: author's own development

The proposed modified methodology for analyzing streaming data is designed to enhance the accuracy of failure predictions and improve the monitoring system by addressing the unique characteristics of submersible pump operation. The use of recurrent neural networks (RNNs), including LSTM and GRU modifications, allows the system to effectively process sequential time series and identify relationships between variable parameters. Unlike traditional statistical methods that rely on fixed analysis intervals and averages, this methodology accounts for both short-term fluctuations and long-term changes, providing more precise detection of potential malfunctions.

The multi-stage data processing framework begins with cleaning noise and anomalous values that may result from sensor faults or external disturbances. This reduces false-positive signals, which is critical for ensuring uninterrupted operation in demanding industrial environments. Adaptive training of the RNN models ensures that the system can adjust to new conditions without requiring manual intervention, making it particularly effective for high-volume streaming data scenarios.

In practical applications, this methodology enables real-time assessment of equipment conditions. For example, if vibration levels rise significantly, the system analyzes related parameters such as temperature and pressure to identify whether the deviation results from mechanical failure, hydraulic blockage, or a temporary overload. This multi-factor approach distinguishes between minor fluctuations that require no action and critical changes indicating a risk of failure.

Implementation of this methodology in industrial facilities has demonstrated a significant reduction in emergency equipment shutdowns by enabling early detection of system deviations and preventing critical malfunctions. By analyzing complex relationships between key parameters, the system minimizes unnecessary shutdowns caused by false-positive signals and ensures stable operation even under high load conditions.

This approach supports condition-based maintenance strategies, reducing downtime and operating costs while extending the lifespan of equipment. It ensures the efficient use of resources and the smooth operation of critical processes, offering businesses a significant advantage in reliability and operational efficiency.

To evaluate the effectiveness of the proposed forecasting model, an experiment was conducted using data collected over one year from three production facilities with high operational loads. The primary goal was to predict pump failures as a binary phenomenon (failure/normal operation) and to assess key parameters such as pressure, temperature, vibration, and electricity consumption. This approach allowed a clear distinction between classification tasks (binary prediction) and regression tasks (continuous parameter prediction), avoiding ambiguity in evaluation metrics.

Two groups of models were analyzed: the proposed model based on modified recurrent neural networks (RNNs) and traditional statistical models, including standalone decision trees, Random Forest, and Gradient Boosting. All models were compared using the following key metrics: precision, recall, and F1-score for classification tasks, and mean absolute error (MAE) and mean squared error (MSE) for regression tasks.

Table 4 presents the results of the comparative evaluation of model efficiency for predicting the technical condition of pumps, highlighting the strengths of the proposed approach for each parameter.

Table 4 – Results of comparative evaluation of the efficiency of the proposed model for predicting the technical condition of submersible pumps

Performance Evaluation Metric	Description	Parameter	Proposed Model Results	Traditional Model Results
Precision	Proportion of correct forecasts among all forecasts	Failure prediction	90%	85%
Recall	Ability of the model to correctly detect actual failures	Failure prediction	88%	78%
F1-Score	Balance between precision and recall	Failure prediction	89%	80%
Mean Absolute Error (MAE)	Average absolute difference between predictions and actual values	Pressure	0.03	0.08
		Temperature	0.02	0.07
		Vibration	0.04	0.09
		Electricity consumption	0.01	0.05
Mean Squared Error (MSE)	Average squared difference between predictions and actual values	Pressure	0.05	0.12
		Temperature	0.04	0.10
		Vibration	0.06	0.14
		Electricity consumption	0.03	0.08

Source: author's own development

The results demonstrate that the proposed model significantly outperformed traditional methods across all key metrics. Specifically, the high precision (90%) indicates the model's ability to correctly identify true positives while minimizing false positives. The recall (88%) highlights its capability to identify a high proportion of actual faults, reducing emergency shutdown risks and ensuring uninterrupted operation.

The separate analysis of parameters (pressure, temperature, vibration, and electricity consumption) shows that the proposed model achieves substantially lower mean absolute error (MAE) and mean squared error (MSE) compared to traditional methods. For instance, the prediction of temperature is characterized by the lowest MAE (0.02) and MSE (0.04), demonstrating the model's high precision in this category.

This detailed evaluation approach clarifies the strengths of the proposed model in handling each parameter effectively, enabling improved maintenance planning. In comparison, traditional methods exhibit higher errors and struggle with incorporating historical dependencies, which are critical for accurate predictions in real-time industrial environments.

One of the main challenges of implementing predictive maintenance systems is the high cost of modernizing infrastructure and purchasing the necessary equipment. Businesses often face high financial costs for installing IoT sensors, providing high-bandwidth data transmission channels, and deploying servers to process large amounts of information in real-time. In addition, existing enterprise information systems are not always compatible with new technological solutions, which requires additional costs for software integration and adaptation of information architecture.

Another problem is the difficulty of customizing artificial intelligence algorithms and adapting them to specific operating conditions. Machine learning algorithms require training on large data sets to make accurate predictions. However, this data may be uneven or contain gaps due to technical failures in the operation of sensors [2].

This can affect the quality of the model and increase the number of false-positive or false-negative fault signals, which complicates the operation of the monitoring system. It is also important to take into account that the operating conditions of pumping equipment can change due to changes in the operating

environment or external factors such as temperature or load level, which requires model flexibility and the ability to retrain.

Another challenge is the need to train the personnel who will work with the predictive maintenance system. Sophisticated data processing algorithms and monitoring systems require qualified professionals who can monitor the system's operation, analyze forecast results, and respond to signals of possible failures in a timely manner. This requires the implementation of training programs for technical staff and the involvement of specialists with experience in analytical systems and artificial intelligence algorithms [8].

To solve these problems, the integration of predictive maintenance systems should be carried out in stages, starting with the implementation of pilot projects at critical nodes of the production system. This allows you to evaluate the system's effectiveness in real-world conditions and establish the process of data collection and processing before large-scale implementation. At the initial stage, special attention should be paid to choosing IoT sensors with a high level of accuracy and stability, as well as setting up data transmission systems to ensure minimal signal delay.

It is recommended that machine learning models with a regular retraining function be implemented to adapt algorithms to changing operating conditions and eliminate the impact of unstable data. In addition, data filtering algorithms should be used to minimize false positives, eliminating random distortions caused by technical failures or external factors [5]. Particular attention should be paid to the creation of backup data storage systems to avoid the loss of critical information in the event of failures.

To increase the level of readiness of the enterprise to work with the predictive maintenance system, it is necessary to implement training programs for technical personnel and conduct regular training on the use of the system. This will ensure prompt response to system signals and timely maintenance decisions. Successful integration of the predictive maintenance system will allow the company to move to real data-driven management strategies, which will increase resource efficiency, reduce the number of emergency downtime, and ensure the stability of pumping equipment in the long term.

Conclusions and prospects for further research. The study confirmed the effectiveness of integrating artificial intelligence algorithms and IoT sensors for predicting both pump failures as a binary phenomenon and specific quantitative parameters such as temperature, pressure, vibration, and power consumption under actual operating conditions. The proposed modified methodology for analyzing streaming data demonstrated significantly higher prediction accuracy compared to traditional methods due to its use of adaptive recurrent neural network (RNN) models and advanced data pre-filtering algorithms. By accounting for both short-term fluctuations and long-term trends, the methodology provides a comprehensive approach to assessing pump conditions.

Key results include a substantial reduction in false-positive signals, which minimizes unnecessary equipment shutdowns, and improved detection of actual failures, ensuring prompt and reliable maintenance interventions. These outcomes were achieved by leveraging multifactor models that incorporate the most critical parameters affecting pump performance. This capability allows for condition-based maintenance strategies, reducing emergency downtime and optimizing operational costs.

However, the implementation of predictive maintenance systems is not without challenges. High costs associated with infrastructure modernization, IoT sensor integration, and the configuration of algorithms to handle variable streaming data remain significant barriers. The need for skilled personnel to operate these systems and the incompatibility of existing information architectures with modern IoT solutions further complicate adoption.

To overcome these obstacles, phased integration is recommended, starting with pilot projects in critical areas to test and adapt algorithms to real-world conditions. Regular retraining of models and the application of filtering algorithms can mitigate the effects of anomalous data and noise. Additionally, ensuring reliable data transmission channels with minimal latency and implementing backup storage systems are essential for preventing data loss and maintaining system integrity.

Future research should focus on optimizing artificial intelligence algorithms for incomplete or irregular data and developing universal models adaptable to diverse operating conditions. A promising direction involves creating systems capable of autonomously identifying new failure patterns and updating forecasting models without manual intervention. This will further enhance the autonomy and reliability of predictive maintenance systems, ensuring continuous and efficient operation of industrial equipment in dynamic and complex environments.

References:

1. Machine Learning Approach for Predictive Maintenance of the Electrical Submersible Pumps (ESPs) / R. Abdalla et al. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, No. 21. P. 17641-17651. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05881> (date of access: 16.01.2025).
2. A review on the advancements and challenges of artificial intelligence based models for predictive maintenance of water injection pumps in the oil and gas industry / S. Mohamed Almazrouei et al. *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5, no. 12. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05618-y> (date of access: 16.01.2025).
3. Fault Identification of Electric Submersible Pumps Based on Unsupervised and Multi-Source Transfer Learning Integration / P. Yang et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 16. P. 9870. URL: <https://doi.org/10.3390/su14169870> (date of access: 16.01.2025).
4. Quantitative risk assessment of submersible pump components using interval number-based multinomial logistic regression model / P. Bhattacharjee et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. P. 108703. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108703> (date of access: 16.01.2025).
5. Fault diagnosis of electric submersible pumps using a three-stage multi-scale feature transformation combined with CNN-SVM / J. Chen et al. *Energy Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/ente.202201033> (date of access: 16.01.2025).
6. Implementation of machine learning methods in predicting failures in electrical submersible pump machines / S. Saptadi et al. *Multidisciplinary Science Journal*. 2024. Vol. 7, no. 3. P. 2025137. URL: <https://doi.org/10.31893/multiscience.2025137> (date of access: 16.01.2025).
7. Rigorous review of electrical submersible pump failure mechanisms and their mitigation measures / S. Fakher et al. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 3799–3814. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01271-6> (date of access: 16.01.2025).
8. Al-Ballam S., Karami H., Devegowda D. A Hybrid Physical and Machine Learning Model to Diagnose Failures in Electrical Submersible Pumps. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, UAE, 23–25 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.2118/214632-ms> (date of access: 16.01.2025).
9. Kannaujia V., Bhore S. P., Goyal H. S. Failure Analysis of Submersible Pumps—A Review. *Recent Advances in Industrial Machines and Mechanisms*. Singapore, 2024. P. 393–410. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4270-1_40 (date of access: 16.01.2025).
10. Takacs G. Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance. Gulf Professional Publishing, 2017. URL: <https://books.google.com>. (date of access: 16.01.2025).
11. Current Status and Applications for Hydraulic Pump Fault Diagnosis: A Review / Y. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 24. P. 9714. URL: <https://doi.org/10.3390/s22249714> (date of access: 16.01.2025).
12. Anomaly Detection Based on Temporal Attention Network with Adaptive Threshold Adjustment for Electrical Submersible Pump / Q. Li et al. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tim.2024.3436113> (date of access: 16.01.2025).
13. A parallel deep neural network for intelligent fault diagnosis of drilling pumps / J. Guo et al. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 133. P. 108071. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108071> (date of access: 16.01.2025).
14. Yu D., Zhang H. Fault Diagnosis Method for Submersible Reciprocating Pumping Unit Based on Deep Belief Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 109940–109948. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3002376> (date of access: 16.01.2025).
15. Turchyn O. Implementation of Machine Learning to Increase the Accuracy of Forecasting the Operating Modes of Deep-Sea Pumping Stations. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2024. Vol. 55. P. 24–29

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-05>

УДК 004.8:004.93*1

Korostin Oleksandr, Master's degree, Principal Software Engineer

<https://orcid.org/0009-0007-7510-6757>

Shipnext BV, Koningin Elisabethlei 16, Antwerp, Belgium

OPTIMISING MACHINE LEARNING INTEGRATION IN REAL-TIME TEXT ANALYTICS PLATFORMS: TECHNICAL APPROACHES AND PERFORMANCE CRITERIA

Korostin O. Optimising Machine Learning Integration in Real-Time Text Analytics Platforms: Technical Approaches and Performance Criteria. The article investigates the integration of machine learning into real-time platforms for analysing text streams. The relevance of the topic is driven by the growing volume of unstructured textual data and the need for its prompt and accurate processing to support decision-making in such fields as media monitoring, cybersecurity, finance, and healthcare. The effectiveness of such platforms is shown to depend on the adaptability of algorithms, analysis accuracy, scalability, and transparency of results. Special attention is paid to the technical aspects of implementation, including distributed architecture, streaming data processing, optimisation of computing resources, and integration of explainable models. The purpose of the article is to study the possibilities of integrating machine learning algorithms into real-time platforms for analysing text streams, in particular, to develop approaches to improving the efficiency of data processing, ensuring their transparency and adaptability in a changing information environment. To achieve this goal, the study applies a combination of literature analysis, comparative evaluation of existing algorithms, and an experimental assessment of technical solutions. The findings indicate that the main challenges of integration include the computational complexity of deep models, scalability constraints, and delays in data stream processing. It has been shown that the use of distributed computing technologies, hardware accelerators (GPU/TPU), and online learning mechanisms significantly improves the performance of such platforms. The application of adaptive algorithms capable of real-time parameter updates increases analysis accuracy under unstable data conditions. The study concludes that integrating machine learning into real-time systems enhances the speed, reliability, and scalability of text analytics. Further research should focus on developing universal multilingual platforms that combine energy efficiency, modularity, and high analytical performance.

Keywords: machine learning, text streams, real-time platforms, algorithm adaptability, data analysis, distributed computing, performance optimisation, algorithm transparency.

Коростін О.О. Оптимізація інтеграції машинного навчання у платформи аналізу текстових потоків у реальному часі: технічні підходи та критерії ефективності. У статті досліджується інтеграція алгоритмів машинного навчання у платформи реального часу для аналізу текстових потоків. Актуальність теми зумовлена стрімким зростанням обсягів неструктурованих текстових даних та необхідністю їх своєчасної обробки для підтримки прийняття рішень у сферах медіа-моніторингу, кібербезпеки, фінансів і медицини. Показано, що ефективність таких платформ залежить від адаптивності алгоритмів, точності аналізу, масштабованості та прозорості результатів. Особливу увагу приділено технічним аспектам реалізації, зокрема розподіленій архітектурі, потоковій обробці даних, оптимізації обчислювальних ресурсів і впровадженню пояснюваних моделей. Метою статті є дослідження можливостей інтеграції алгоритмів машинного навчання у платформи реального часу для аналізу текстових потоків, зокрема розроблення підходів до підвищення ефективності обробки даних, забезпечення їх прозорості та адаптивності в умовах змінного інформаційного середовища. Для досягнення поставленої мети використано методи аналізу наукових джерел, порівняння існуючих алгоритмів та експериментального дослідження технічних рішень. У результаті встановлено, що основними проблемами інтеграції є висока обчислювальна складність глибоких моделей, обмеження масштабованості та затримки при обробці потоків. Доведено, що застосування технологій розподілених обчислень, апаратних прискорювачів (GPU/TPU) та механізмів онлайн-навчання суттєво підвищує продуктивність таких платформ. Впровадження адаптивних алгоритмів з можливістю оновлення параметрів у реальному часі покращує якість аналізу в умовах нестабільних даних. Зроблено висновок, що інтеграція машинного навчання у платформи реального часу забезпечує підвищення швидкості, надійності та масштабованості аналітики текстових потоків. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням універсальних багатомовних платформ, які поєднують енергоефективність, модульність і високу аналітичну продуктивність.

Ключові слова: машинне навчання, текстові потоки, платформи реального часу, адаптивність алгоритмів, аналіз даних, розподілені обчислення, оптимізація продуктивності, прозорість алгоритмів.

Problem statement. With the development of digital technologies, the amount of textual data generated in real-time is growing exponentially, creating challenges for the efficient collection, processing and analysis of information. Traditional rule-based or statistical methods often lack the flexibility and speed required to extract meaningful insights from unstructured, dynamic, and multilingual text streams. In contrast, machine learning offers a powerful toolkit for recognising patterns, adapting to changing data, and handling complexity without manual intervention.

Machine learning, as a key component of modern information systems, provides methods for identifying key trends, classifying data, predicting events, and even automatically generating content — all of which are increasingly needed in high-pressure, time-sensitive contexts. The application of machine learning to real-time analytics aims to address the problem of latency and information overload: when data

arrives faster than it can be analysed using conventional tools, critical decisions may be delayed or misinformed. By integrating machine learning into real-time platforms, the goal is to enhance the speed, scalability, and adaptability of analytical systems to support decision-making in domains such as media monitoring, crisis response, financial forecasting, and cybersecurity. These are areas where milliseconds matter, and where insight must be extracted from large volumes of unstructured text with minimal delay.

The application of machine learning for real-time text stream analysis requires solving a number of important scientific and practical tasks. In particular, this includes the development of efficient algorithms capable of analysing text data in real-time, optimising the use of computing resources, and ensuring transparency and explainability of the analysis results. The scientific significance of the research lies in the formation of new approaches to text data processing that will contribute to the development of artificial intelligence methods and expand their applications. The practical significance is determined by the possibility of integrating these developments into real platforms for analysing information flows, which will help to increase the efficiency of decision-making, reduce risks and improve management processes.

Analysis of the latest research and publications. Integrating machine learning into real-time platforms for analysing text streams is a relevant area of research that demonstrates significant achievements in improving the accuracy, speed, and adaptability of data processing. A. Guha and D. Samanta [1] developed a multi-level text classification system that provides high accuracy of results in real time by combining machine learning algorithms. Their approach proved effective in minimising document classification errors, which is especially important for streaming data.

M. Yu, Q. Huang, H. Qin, C. Scheele and C. Yang [2] studied applying deep learning to social media analysis during disasters like hurricanes. Their approach proved highly effective in real-time, allowing for the rapid identification of critical information and situational awareness. In their review, Q. Li, H. Peng, J. Li, et al. [3] examined the evolution of text classification, focusing on deep learning methods. The results confirm that such approaches significantly increase classification accuracy, even for large amounts of streaming data.

G. Gomes, J. Read, A. Bifet, and J. Gama [4] studied the main challenges of working with streaming data and proposed adaptive machine-learning models to ensure the stable operation of real-time systems. Their study emphasises the importance of optimising algorithms for high-speed text processing. In their review, M. Bahri, A. Bifet, J. Gama, and S. Maniu [5] identified the key tasks of data stream analysis and emphasised the need to standardise processing methods to improve their efficiency.

B. Hammou, A. Lahcen, and S. Mouline [6] developed a distributed architecture for streaming analytics that uses recurrent neural networks and FastText. Their approach significantly reduced text processing time and demonstrated high performance even under heavy load. A. Rodrigues, R. Fernandes, A. Shetty, et al. [7] studied methods for detecting spam in social networks and showed that their model provides more than 90% accuracy in real time. These results confirm the importance of combining machine learning and deep learning methods.

D. Jayanthi and G. Sumathi [8] proposed a powerful framework for streaming analytics that demonstrates high speed of processing text streams. Their method allows for efficient management of dynamic data, particularly in large systems. S. Minaee, N. Kalchbrenner, E. Cambria, et al [9] performed a comprehensive analysis of deep learning methods for text classification, emphasising the high accuracy of hybrid models. K. Lopes Dias, M. A. Pongelupe, W. M. Caminhas, and L. de Errico [10] developed an innovative model for network traffic classification that demonstrated high adaptability and can be used for text analysis. M. Umer, Z. Imtiaz, M. Ahmad and co-authors [11] proved that the combination of FastText and convolutional neural networks significantly improves text classification results by increasing the accuracy and processing speed. M. Yu, H. Qin, Q. Huang et al. [12] presented an effective solution for analysing social media in emergency situations. Their approach made it possible to quickly identify critical information, providing fast decision-making. N. Sharma, R. Sharma, and N. Jindal [13] considered the application of machine learning in text analysis, emphasising its important role in processing large amounts of data. S. Boppiniti [14] studied streaming analytics with a focus on dynamic decision-making, proposing a model that optimises real-time text processing. O. Khodorkovskiy [15] examined methods of training artificial intelligence agents for process control systems that allow the integration of machine learning into current platforms.

The results of the analysis confirm that the use of machine learning to analyse text streams in real time allows achieving high accuracy, efficiency, and adaptability. The key areas are the development of adaptive algorithms, hybrid models, and optimisation of methods for processing large amounts of data.

Identification of previously unsolved parts of the problem. Despite significant progress in the application of machine learning to text stream analysis, the problems of algorithms' adaptability to dynamic conditions, noisy data, and multilingualism remain unresolved, which reduces the accuracy and speed of analysis. The absence of universal evaluation criteria that take into account scalability, transparency and noise resistance limits the effectiveness of current approaches.

Technical challenges of integration, including scalability and resource optimisation, make it difficult to implement productive real-time solutions due to significant computational costs.

The study aims to overcome these gaps by analysing the adaptability of algorithms, developing evaluation criteria, and optimising technical solutions to improve the efficiency of platforms in dynamic environments.

The **purpose of the article** is to study the possibilities of integrating machine learning algorithms into real-time platforms for analysing text streams, in particular, to develop approaches to improving the efficiency of data processing, ensuring their transparency and adaptability in a changing information environment.

Objectives of the article:

1. To analyse modern machine learning methods used to analyse text streams in real time and to develop criteria for their evaluation, taking into account the efficiency of working with large amounts of data.
2. Investigate the technical aspects of integrating machine learning algorithms into real-time platforms, including scalability, computational performance, and adaptability to dynamic conditions.
3. Develop recommendations for optimising machine learning algorithms to improve the accuracy, performance and stability of text stream analysis.

Summary of the main material. The key motivation for applying machine learning to real-time text analytics lies in its ability to overcome the limitations of traditional rule-based systems, which struggle to scale, adapt, and interpret dynamic, high-volume data flows. In real-time environments, it is essential to extract relevant insights from constantly updating unstructured text, where the volume and velocity of data often exceed the capacity of manual or static analytical tools. Machine learning enables automated, flexible, and context-aware processing, making it a critical component for timely and accurate decision-making.

Real-time analysis of text streams using machine learning methods is one of the key tasks of modern information systems. The methods used to solve these tasks include text classification, topic detection, sentiment analysis, anomaly detection, and text generation. These algorithms allow processing large amounts of data in a short time, providing the ability to make quick decisions based on the analysis of relevant information. The most popular approaches are deep learning models (neural networks), natural language processing (NLP) methods, and classical classification and regression algorithms (Table 1).

Table 1 – Modern machine learning methods for analysing text streams in real time

Method	Description	Advantages of using
Neural networks (RNN, LSTM, Transformer)	Provides context-aware text analysis by processing word sequences.	High accuracy of text analysis with contextualisation; scalability to work with big data.
Classification algorithms	Methods such as SVM or Random Forest are used to categorise text.	Easy to implement; fast processing of small amounts of data; efficient for basic tasks.
Thematic modelling (LDA)	Identify the main themes in large text datasets.	Automation of text stream analysis; ability to process heterogeneous texts.
Sentiment analysis	It is used to determine the emotional tone of a text, positive or negative.	Application in marketing and customer experience research; adaptability to different domains.
Anomaly detection	Methods for finding atypical texts or behavioural patterns in text streams.	Improved security; effective in detecting rare events or threats.

Source: compiled by the author on the basis of [1; 2; 4; 5].

Real-time analysis of text streams using machine learning methods is one of the key tasks of modern information systems. The methods used to solve these tasks include text classification, topic detection, sentiment analysis, anomaly detection, and text generation. The most popular approaches include deep learning models (neural networks), natural language processing (NLP) methods, and classical classification

and regression algorithms. For example, neural networks such as GPT are widely used for automatic text generation, providing high accuracy and contextual relevance [16]. BERT, developed by Google, has become the basis for many NLP applications due to its ability to consider both the text's previous and subsequent context [17]. TensorFlow, a leading platform for developing machine learning models, offers tools for implementing sentiment analysis and text classification [18]. Scikit-learn effectively implements methods such as classification and topic modelling, in particular through the LDA algorithm [19]. IBM is actively implementing real-time solutions focused on data analysis and anomaly detection, which allows automating processes in various industries [20].

These methods and platforms are key to ensuring practical real-time analysis of text streams, improving the accuracy of data processing, and adapting to changing conditions.

Evaluation of algorithms' effectiveness for working with large amounts of text data is based on generally accepted criteria that allow determining whether an algorithm meets the tasks set. Such criteria are used to analyse algorithms' performance, accuracy, scalability, and adaptability in different conditions. They are universal and can be used to evaluate algorithms in many areas, including real-time text stream analysis. The main criteria include accuracy, which describes the level of conformity of the results to the expected ones, speed, which determines the ability of the algorithm to process data in real time, noise tolerance, which shows its effectiveness in cases with incomplete or corrupted data, and scalability, which ensures the ability to work with increasingly large amounts of information. The transparency of the algorithm also plays an important role, as it allows for the interpretation of the results, which is critical in areas such as medicine or finance (Table 2).

Table 2 – Criteria for evaluating the effectiveness of algorithms for working with large amounts of text data

Criterion	Description	Relevance to modern conditions
Analysis accuracy	The percentage of correctly processed text data.	Ensures the reliability of the results required for decision-making.
Speed of operation	The time required to process one text stream.	Allows you to process large amounts of data in real time.
Resistance to noise	The ability of the algorithm to work with incomplete or damaged data.	Increases efficiency in situations with a large number of incorrect records.
Scalability	The ability of the algorithm to work with increasingly large amounts of data.	Allows the algorithm to be used in large systems.
Transparency of results	The level of clarity of the results obtained for the end user.	Ensures confidence in the results and the ability to interpret them.

Source: compiled by the author on the basis of [3; 4; 5; 9; 11].

Each of these criteria has practical implications for data analytics. For example, accuracy is key in areas such as medicine or finance, where even minor errors can have serious consequences. The speed of the algorithm is especially important in real-time systems, for example, for monitoring crisis situations or detecting fake news on social media. Resistance to noise ensures efficiency in working with low-quality data, which is often the case in open sources. Scalability allows algorithms to maintain performance even if the volume of text streams increases significantly. Transparency of results helps to increase trust in algorithms, as users are able to understand how certain conclusions were reached.

In real life, these criteria are interrelated: a highly accurate algorithm may require more time to process data, and scalability may affect noise resistance. Therefore, their use in combination allows you to balance different aspects of efficiency and find the best solution for a particular task.

Integration of machine learning into real-time platforms for text stream analysis requires not only high accuracy of algorithms, but also the ability of systems to provide stable performance in dynamic conditions [4]. One of the key aspects is the optimal use of computing resources, which affects the speed of text data processing, system resilience to high loads, and scalability.

The technical implementation of such platforms includes three key elements: the architectural organisation of the system, data flow management, and algorithm adaptability. The architectural component

involves the use of multi-level distributed systems that allow processing text streams in parallel, reducing delays. Data flows are managed through streaming processing platforms such as Apache Kafka, which allows for real-time information processing. The adaptability of algorithms implies their ability to dynamically adjust parameters to reduce computational complexity (Table 3).

Table 3 – Technical aspects of integrating machine learning into real-time platforms for analysing text streams

The integration aspect	Technical description	Expected effect
Distributed architecture	Organising computing on multiple nodes to reduce latency and increase speed.	Improved system performance and stability under high loads.
Data flow management	Processing information as it arrives with minimal delay.	Reduced time for analysing text streams.
Adaptability of algorithms	Dynamic optimisation of model parameters during processing.	Improved processing accuracy by adjusting to changing conditions.
API integration	Interaction with other systems for data transmission and processing.	Improved accessibility and interoperability between platforms.
Energy efficiency	Optimising hardware performance to reduce energy consumption.	Reduced energy consumption and infrastructure support costs.

Source: compiled by the author on the basis of [4; 5; 6; 8; 10; 15].

Table 3 demonstrates the key aspects of integrating machine learning into real-time platforms, each of which addresses specific technical challenges required to ensure the stable operation of such systems. Distributed architecture is the basis for efficient processing of large amounts of data, as it allows for even distribution of computational loads across multiple nodes, reducing latency and increasing system performance. This approach is indispensable for platforms that work with scalable text streams, where the amount of data can change dynamically.

Data flow management provides real-time information processing, which minimises delays in the transmission and analysis of text streams [7]. This allows platforms to respond to new data in a timely manner, which is critical for monitoring social media or identifying crisis events. The adaptability of the algorithms allows the parameters of machine learning models to be dynamically adjusted in accordance with changes in the structure and content of text streams, which ensures more accurate analysis even in the face of uneven or unpredictable data flow.

API integration helps to create flexible systems that can effectively interact with other platforms and data sources. This ensures synchronisation between different modules of the system, which is especially important for large corporate platforms where compatibility of various software is required. Energy optimisation minimises the cost of computing resources, reducing financial and environmental costs while ensuring high system performance.

Such technical solutions are the basis for creating effective platforms that can meet the requirements of a modern dynamic environment and provide high-quality real-time analysis of text streams.

To confirm the practical applicability of machine learning integration into real-time text stream analytics platforms, an experimental environment was developed to simulate the operation of a typical high-load analytical system. The setup included a streaming data input module, a processing infrastructure for machine learning models, and a real-time performance monitoring unit.

The input data stream consisted of 10,000 short multilingual text messages in English, German, and Ukrainian, arriving at a speed of 150 messages per second via Apache Kafka. The dataset included a variety of content types — news headlines, social media posts, and synthetic messages — with intentional noise such as spelling errors, abbreviations, emojis, and mixed language segments to reflect real-world conditions.

Text processing was performed using three different machine learning models: a classical Support Vector Machine (SVM) classifier, a Random Forest ensemble, and a BERT transformer model implemented in TensorFlow using the HuggingFace Transformers library. The system was deployed in a virtualized environment using Docker containers, with workload orchestration handled via Kubernetes. The computational infrastructure included an Intel Xeon Silver 4216 32-core processor, an NVIDIA Tesla T4

GPU (16 GB), and 128 GB of RAM. Model performance was tracked in real time using TensorBoard, capturing metrics such as latency, accuracy, and resource utilization.

Table 4 – Comparative evaluation of machine learning models for real-time text stream processing

Model	Classification accuracy (%)	Average latency per message (ms)	Resource utilization (CPU / GPU)	Noise robustness	Notes
SVM	78.4	13	25% / 0%	Low	Fast, but weak against unstructured or noisy data
Random forest	81.2	24	35% / 0%	Medium	Requires pre-cleaned input for optimal results
BERT (TensorFlow)	92.7	81	60% / 85%	High	Highest accuracy, but resource-intensive

Source: own author's development

The results of the experiment demonstrate that the BERT model achieves the highest classification accuracy and shows excellent robustness to noise and non-standard input, making it highly suitable for real-time scenarios where data structure varies rapidly. However, its performance comes at the cost of significant GPU usage and higher latency. The Random Forest model provides a reasonable compromise between accuracy and computational efficiency, performing well when the input stream is preprocessed. The SVM classifier delivers the lowest latency, but its accuracy degrades noticeably when handling noisy or multilingual text streams.

This simulation allowed the observation of trade-offs between accuracy, resource consumption, and real-time responsiveness—factors critical for designing efficient, scalable, and adaptive machine learning-based platforms for text analytics.

To visualize the architecture used in the experiment, a simplified block diagram is presented in Figure 1, illustrating the flow of data and interaction between system components.

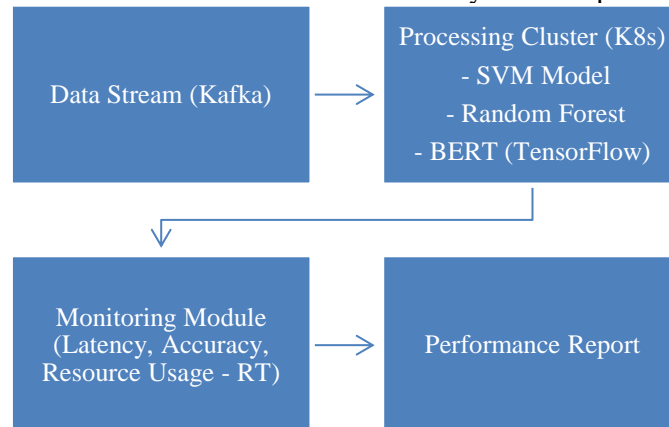


Fig.1. Experimental architecture for real-time text stream analysis

The diagram illustrates the sequential flow of data in the experimental setup: incoming text streams are transmitted via Apache Kafka to a Kubernetes-based processing cluster containing machine learning models (SVM, Random Forest, and BERT). The outputs of these models are forwarded to a real-time monitoring module that captures key performance metrics, including latency, classification accuracy, and system resource usage. The final evaluation is presented in the form of a performance report.

Integrating machine learning algorithms into real-time text stream analysis platforms faces numerous challenges that affect the efficiency, accuracy, and adaptability of such systems in dynamic environments. The main problem is the computational complexity of algorithms, especially deep learning models such as GPT [15] or BERT [16], which require significant resources to process large amounts of text data. Implementing such models in real-time systems where minimal latency is critical makes it

difficult. This limitation is particularly evident in edge computing environments or mobile platforms with restricted CPU/GPU capacities, where large-scale models cannot be deployed without aggressive model compression or simplification.

Another significant problem is related to the variability of text streams. In dynamic environments, such as social media or crisis communications, the content and structure of text data are constantly changing, leading to a decrease in model accuracy due to outdated parameters. The ability of algorithms to adapt to these changes is limited, affecting the analysis quality. Most current models are trained in batch mode and lack support for continuous learning or online adaptation, which reduces their effectiveness when patterns shift rapidly. Additionally, re-training models in real time is often not feasible due to the high computational cost.

Data complexity, such as multilingualism, different formats, or a significant amount of noise, also creates challenges for effective analysis. For example, algorithms may not correctly process texts that contain grammatical errors, abbreviations, or specialised vocabulary, which is common in real-world data streams [14]. Moreover, many NLP models are initially trained on formal or structured datasets, which makes them poorly suited for analysing informal or domain-specific language unless fine-tuned — a process that again requires annotated data and time.

Another problem is the platforms' scalability. With a significant increase in the amount of data or the number of users, systems can lose stability, which affects the processing speed and accuracy of the results. This requires complex technical solutions, such as distributed computing, which are not always easy to integrate into existing infrastructure. Furthermore, scaling real-time systems involves challenges not only in computing but also in synchronising data flows, managing resource contention, and maintaining low-latency performance across nodes.

The transparency of algorithms and difficulties in interpreting the results are also serious challenges. Most modern models operate as black boxes, making it difficult to understand decision-making processes, especially when mistakes such as medicine or finance can have serious consequences. This lack of interpretability limits their practical use in regulated domains, where explainability is legally or ethically required. Additionally, concerns about algorithmic bias and the inability to audit model behaviour in real time are significant obstacles to their safe deployment.

Optimisation of algorithms for real-time text stream analysis requires consideration of both technical and methodological aspects to achieve high performance and accuracy. One of the key areas is the use of hybrid models that combine the advantages of multiple approaches, such as deep learning and topic modelling. This combination helps improve analysis flexibility and better handle heterogeneous, noisy, or multilingual data typical for real-time environments.

Another important aspect is the optimisation of computing resources, especially relevant for systems with limited processing capacity (e.g., mobile or edge devices). Distributed computing solutions and hardware accelerators such as GPUs or TPUs [7] allow for real-time processing of large text volumes. In addition, the use of containerisation platforms like Docker and orchestration systems such as Kubernetes ensures dynamic scalability and efficient resource allocation depending on workload fluctuations [8].

To address the problem of outdated model parameters and ensure responsiveness to changing input streams, it is necessary to implement online learning mechanisms that support incremental updates. This approach improves adaptability and maintains accuracy in fast-changing environments, such as social media monitoring.

Given the prevalence of noisy and unstructured data in real-world streams, preprocessing methods such as text normalisation, spelling correction, removal of duplicates, and handling of special symbols should be integrated as a standard pipeline component.

To overcome the challenge of algorithmic opacity and improve interpretability, it is recommended to use explainable models (XAI) [9], especially in high-risk domains like medicine or finance. These models support transparency and allow users to understand the basis for specific conclusions or predictions.

Regular testing and validation of algorithms on real-time data streams should be an essential part of deployment to identify performance degradation or bias early. It is also advisable to adopt energy-efficient computing practices and lightweight model architectures to ensure sustainability, especially in large-scale and always-on systems.

Thus, optimisation of machine learning algorithms must be multi-layered and closely aligned with real-time system constraints. Only such a holistic approach will ensure the reliable and efficient operation of text stream analysis platforms in dynamic and resource-sensitive environments.

Conclusions and prospects for further research. The study confirmed that integrating machine learning into real-time text analytics platforms significantly enhances their accuracy, adaptability, and efficiency in dynamic environments. Transformer-based models such as BERT demonstrated the highest classification performance and robustness to noisy data, though at the cost of high resource usage and increased latency. Classical models like SVM and Random Forest offered faster processing and lower computational demand but showed reduced accuracy, especially with unstructured input.

Key challenges include computational complexity, limited adaptability to changing data streams, and insufficient transparency of algorithmic decisions. These were addressed through experimental testing, which highlighted the trade-offs between accuracy, latency, and resource consumption.

To improve system performance, the use of distributed computing (e.g., Apache Kafka), hybrid modelling approaches, online learning, and explainable AI techniques is recommended.

Further research should focus on developing adaptive, resource-efficient algorithms and modular platforms that support real-time model updates and maintain explainability under varying data conditions.

References:

1. Guha, A., & Samanta, D. (2020). Real-time application of document classification based on machine learning. In L. Jain, S. L. Peng, B. Alhadidi, & S. Pal (Eds.), *Intelligent computing paradigm and cutting-edge technologies. ICICCT 2019* (Vol. 9, pp. 401–416). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38501-9_37
2. Yu, M., Huang, Q., Qin, H., Scheele, C., & Yang, C. (2020). Deep learning for real-time social media text classification for situation awareness – Using Hurricanes Sandy, Harvey, and Irma as case studies. In *Social sensing and big data computing for disaster management* (pp. 33–50). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003106494-3>
3. Li, Q., Peng, H., Li, J., Xia, C., Yang, R., Sun, L., Yu, P. S., & He, L. (2022). A survey on text classification: From traditional to deep learning. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 13(2), 1–41. <https://doi.org/10.1145/3495162>
4. Gomes, H. M., Read, J., Bifet, A., Barddal, J. P., & Gama, J. (2019). Machine learning for streaming data: State of the art, challenges, and opportunities. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 21(2), 6–22. <https://doi.org/10.1145/3373464.3373470>
5. Bahri, M., Bifet, A., Gama, J., & Maniu, S. (2021). Data stream analysis: Foundations, major tasks and tools. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(3), e1405. <https://doi.org/10.1002/widm.1405>
6. Hammou, B., Lahcen, A., & Mouline, S. (2020). Towards a real-time processing framework based on improved distributed recurrent neural network variants with FastText for social big data analytics. *Information Processing & Management*, 57(1), 102122. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102122>
7. Rodrigues, A. P., Fernandes, R., Shetty, A., et al. (2022). Real-time Twitter spam detection and sentiment analysis using machine learning and deep learning techniques. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(1), 5211949. <https://doi.org/10.1155/2022/5211949>
8. Jayanthi, D., & Sumathi, G. (2016). A framework for real-time streaming analytics using machine learning approach. In *Proceedings of National Conference on Communication and Informatics-2016* (pp. 15–21). Retrieved from <https://www.researchgate.net>
9. Minaee, S., Kalchbrenner, N., Cambria, E., Nikzad, N., Chenaghlu, M., & Gao, J. (2021). Deep learning-based text classification: A comprehensive review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(3), 1–40. <https://doi.org/10.1145/3439726>
10. Lopes Dias, K., Almeida Pongelupe, M., Caminhas, W. M., & de Errico, L. (2019). An innovative approach for real-time network traffic classification. *Computer Networks*, 158, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.04.004>
11. Umer, M., Imtiaz, Z., Ahmad, M., et al. (2023). Impact of convolutional neural network and FastText embedding on text classification. *Multimedia Tools and Applications*, 82(4), 5569–5585. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13459-x>
12. Yu, M., Qin, H., Huang, Q., et al. (2020). Deep learning for real-time social media text classification for situation awareness – Using Hurricanes Sandy, Harvey, and Irma as case studies. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003106494-3>
13. Sharma, N., Sharma, R., & Jindal, N. (2021). Machine learning and deep learning applications – A vision. *Global Transitions Proceedings*, 2(1), 24–28. <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.01.004>
14. Boppiniti, S. (2021). Real-time data analytics with AI: Leveraging stream processing for dynamic decision support. *International Journal of Management Education for Sustainable Development*, 4(4), 15–25. Retrieved from <https://ijsdcs.com>
15. Khodorkovskiy, O. (2024). Methods of training and adaptation of AI agents in complex process control systems. *The American Journal of Engineering and Technology*, 6(11), 46–53. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume06Issue11-06>
16. OpenAI. (2024). GPT models for text generation and analysis. Retrieved from <https://openai.com>
17. Google AI. (2024). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. Retrieved from <https://ai.google>
18. TensorFlow. (2024). Machine learning frameworks and tutorials. Retrieved from <https://www.tensorflow.org>
19. Scikit-learn. (2024). Machine learning tools for data analysis. Retrieved from <https://scikit-learn.org>
20. IBM. (2024). AI solutions for real-time data processing. Retrieved from <https://www.ibm.com>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-06>

UDC 004.8:174:334.73:361.7

Yaroslav Kravchuk, Web-Developer

<https://orcid.org/0009-0006-1593-9995>

Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

ETHICAL IMPLICATIONS OF AI APPLICATIONS IN NONPROFIT AND CHARITY SECTORS

Kravchuk Y. Ethical Implications of AI Applications in Nonprofit and Charity Sectors. The article analyzes the modern ethical aspects of the use of artificial intelligence (AI) in the activities of non-profit and charitable organizations. The relevance of the study is due to the need to ensure transparency, social responsibility and equal access to digital services in the context of the growing use of AI to automate processes and decision-making in humanitarian initiatives. It was established that the key ethical challenges are the opacity of algorithms, the risks of algorithmic bias, non-compliance with data confidentiality and digital inequality among beneficiaries. The aim of the work is to develop recommendations for the introduction of ethical standards for the use of AI in the non-profit sector, taking into account international practices and ensuring social responsibility. The study used methods of content analysis, systematic comparison and a review of international experience to identify key factors for ensuring the ethics and inclusiveness of digital solutions. The results of the analysis indicate the need to implement the principle of "explained AI", which ensures the transparency of algorithms and their accountability. It has been proven that the use of multilingual interfaces adapted for socially vulnerable groups, as well as the integration of multi-layered data protection policies, increase the level of trust in digital solutions. It is concluded that the effective implementation of AI in humanitarian programs is possible under conditions of constant monitoring and independent audit of algorithms to reduce the risks of "black boxes". Prospects for further research include the development of methods for adapting algorithms to local socio-cultural needs, the study of innovations in the field of personal data protection and the creation of training programs to increase the digital literacy of beneficiaries.

Keywords: artificial intelligence ethics, nonprofit technology, digital transformation, algorithmic accountability, charitable sector innovation.

Кравчук Я.Я. Етичні аспекти застосування штучного інтелекту у неприбутковому та благодійному секторах. У статті проаналізовано сучасні етичні аспекти застосування штучного інтелекту (ШІ) у діяльності неприбуткових і благодійних організацій. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення прозорості, соціальної відповідальності та рівного доступу до цифрових сервісів у контексті зростаючого використання ШІ для автоматизації процесів і прийняття рішень у гуманітарних ініціативах. Встановлено, що ключовими етичними викликами є непрозорість алгоритмів, ризики алгоритмічної упередженості, недотримання конфіденційності даних та цифрова нерівність серед бенефіціарів. Метою роботи є розробка рекомендацій для запровадження етичних стандартів використання ШІ у неприбутковому секторі з урахуванням міжнародних практик та забезпеченням соціальної відповідальності. У дослідженні використано методи контент-аналізу, системного порівняння та огляд міжнародного досвіду для визначення ключових факторів забезпечення етичності та інклюзивності цифрових рішень. Результати аналізу свідчать про необхідність впровадження принципу «пояснюваного ШІ», що забезпечує прозорість алгоритмів та їхню підзвітність. Доведено, що використання багатомовних інтерфейсів, адаптованих для соціально вразливих груп, та інтеграція політик багаторівневого захисту даних підвищують рівень довіри до цифрових рішень. Зроблено висновок, що ефективне впровадження ШІ у гуманітарних програмах можливе за умов постійного моніторингу та незалежного аудиту алгоритмів для зниження ризиків «чорних скриньок». Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою методів адаптації алгоритмів до локальних соціокультурних потреб, вивченням інновацій у сфері захисту персональних даних та створенням навчальних програм для підвищення цифрової грамотності бенефіціарів.

Ключові слова: етика штучного інтелекту, некомерційні технології, цифрова трансформація, алгоритмічна підзвітність, інновації в благодійному секторі.

Problem statement. The use of artificial intelligence in the nonprofit and charitable sectors raises a number of ethical issues that require comprehensive research and implementation of effective regulatory mechanisms. These issues arise in the context of ensuring algorithmic transparency, responsible use of personal data, and maintaining a balance between process automation and social sensitivity of decisions. The use of artificial intelligence technologies contributes to the efficiency of resource management, but there is still a risk of violating the rights of certain groups of people due to possible algorithmic errors or bias, which can lead to unequal access to social programs. In this context, there is a need to develop methodological approaches to analyzing and assessing algorithmic responsibility, which is an important task of modern research in the field of ethics and technology.

From a practical point of view, an important task is to implement the principles of ethical transparency and inclusiveness in the digital transformation of charitable programs to minimize the risks of discrimination and inequality. The proper implementation of artificial intelligence technologies requires the introduction of standards that will regulate the use of data for forecasting and decision-making, taking into account the social, cultural, and economic aspects of organizations. The study of these aspects contributes not only to the development of theoretical approaches to building responsible algorithms but

also forms the basis for creating practical recommendations for their integration into the nonprofit sector to ensure fair distribution of resources and maintain social trust in such programs.

Analysis of the latest research and publications. The ethical use of artificial intelligence (AI) in non-profit organizations covers a wide range of issues, including algorithmic transparency, social responsibility, data protection, and algorithmic justice.

One key aspect is ensuring that algorithms are transparent and explainable. The study by K. Chyzhmar, O. Dniprov, O. Korotiuk, R. Shapoval, and O. Sydorenko examined the issue of information security as a challenge to the development of information technology. The authors proved that insufficient regulation in data protection can lead to leaks of confidential information, which is especially critical for humanitarian programs [1].

The study by L. Floridi et al. proposed the AI4People ethical framework, which outlines the principles of responsibility that help increase trust in algorithmic solutions and reduce the risks of discrimination [2]. B. Mittelstadt proved that ethical principles alone do not guarantee the fairness of AI use, emphasizing the importance of controlling algorithms and checking their impact on social groups [3]. A. Jobin, M. Ienca, and E. Vayena reviewed global ethical guidelines, noting significant differences in standard approaches depending on regional practices and emphasizing the need for unified ethical standards [4]. C. Cath discusses the technical and legal aspects of AI applications and highlights the problem of balancing algorithms' autonomy with respect for human rights [5]. Aspects of algorithmic management and data's impact on non-profit organizations' activities were studied by C. Bopp, E. Harmon, and A. Volda. They emphasize that the lack of transparency of algorithms in the work of social enterprises can reduce the effectiveness of charitable programs and user trust [6]. M. O. Elamin's work showed that modernization of the charity sector through AI can increase resource collection and distribution efficiency but requires measures to prevent bias [7]. The problem of trust in automated systems in charitable initiatives was studied in the article by C. Yang, Y. Yang, and Y. Zhang, where it was found that the level of trust largely depends on the transparency of the algorithms and their ability to be explained [8]. L. Arango, S. P. Singaraju, and O. Niininen examined consumer reactions to charity campaigns created by AI. The authors note that using such systems can effectively attract donors, but adaptation to the cultural and value orientations of the audience is required [9]. In medical philanthropy, C. W. Goodman and K. Chalmers have shown that predictive tools can increase the efficiency of resource allocation. However, there are risks of limiting access to care for certain groups due to technical errors [10].

The impact of automated interaction with users is analyzed in the work of Y. Zhou et al., who showed that communication through chatbots can influence users' moral attitudes and their willingness to participate in charity events [11].

In his study, R. Binns analyzed the lessons of political philosophy to ensure fairness in machine learning and prevent social injustice in AI decisions [12].

Thus, the main challenges in ethically using AI in charitable organizations relate to algorithmic transparency, data protection, and ensuring equal access to assistance. Despite the significant progress in AI adoption, research shows the need to develop adaptive and accountable models to minimize the risks of bias and increase the efficiency of nonprofit organizations.

Highlighting previously unresolved parts of the problem. Despite significant progress in using artificial intelligence (AI) in nonprofit organizations, aspects of transparency, inclusion, and fairness of algorithms remain unresolved. There is still a lack of research on the impact of algorithms on decision-making in socially critical situations.

Data privacy requires adapting international standards to local conditions to strike a balance between data protection and program accessibility. The issue of algorithm explainability also remains relevant: many solutions function as "black boxes," which reduces user trust.

Digital inclusion requires additional analysis of language accessibility, digital literacy, and access to services in remote regions.

The proposed study aims to fill these gaps by formulating recommendations for transparency, data protection, and service adaptability, which will help increase the efficiency and trust in charitable programs.

The article aims to study the ethical aspects of artificial intelligence applications in the nonprofit and charitable sectors and develop scientifically based recommendations for ensuring transparency, algorithmic responsibility, and inclusiveness of digital solutions in organizations' activities.

To achieve this goal, the following tasks are envisaged:

1. Analyze the main AI methods and technologies used in nonprofit and charitable organizations, identifying potential ethical challenges such as transparency, fairness, and inclusion.
2. To study the aspects of confidentiality and responsible use of data in protecting the rights of benefactors and beneficiaries.
3. Develop recommendations for introducing ethical standards for the use of AI based on international practices to increase social responsibility, security, and trust in organizations.

Summary of the main material. Artificial intelligence is becoming an important tool for optimizing the activities of nonprofit and charitable organizations, allowing them to automate processes, increase the efficiency of resource management, and improve communication with beneficiaries. Using machine learning, natural language processing, computer vision, and recommender systems facilitates quick decision-making and implementation of support programs. However, the effectiveness of such solutions depends on the correct application of technologies by the organization's and target groups' needs. Table 1 provides a visual representation of artificial intelligence's main methods and technologies and their functionality.

Table 1 – Main methods and technologies of artificial intelligence in non-profit organizations and their functional purpose

AI method or technology	Appointments in non-profit organizations	Examples of functional use
Machine learning	Predicting the needs of beneficiaries and optimizing aid distribution	Developing models for predicting community needs in humanitarian programs, calculating the amount of resources for crisis situations
Natural language processing	Automation of processing of citizens' appeals and support of communications	Use chatbots to answer queries, analyze text messages to identify priority issues
Computer vision	Monitoring of program implementation and evaluation of project results	Automatic analysis of photo and video materials to check the condition of reconstruction or aid delivery sites
Recommendation systems	Personalization of offers for participants of charity programs	Creating individual recommendations for users of social program selection platforms
Intelligent chatbots	Improving the efficiency of interaction with beneficiaries and donors	Providing information on the status of applications, support in finding the necessary assistance

Source: compiled by the author based on [13; 14].

In the current environment, non-profit organizations actively use machine learning methods to predict humanitarian needs. In Ukraine, an example is the SpivDiya platform [15], which works to coordinate humanitarian aid for internally displaced persons and affected communities during the war. Using data processing algorithms and predictive models, the platform efficiently distributes requests for assistance between support centers and volunteer organizations depending on regional needs and available resources. This helps to reduce delays in assisting and ensures faster processing of applications.

Natural language processing technologies are also used in social projects to improve communication with the public. For example, during the evacuation of the population, AI-powered chatbots helped citizens receive up-to-date information on evacuation routes and safe aid stations.

Computer vision systems are used to monitor humanitarian projects, particularly to verify the delivery of humanitarian supplies to hard-to-reach regions. This allows you to automatically check whether the photo reports from the scene correspond to the stated results.

Recommender systems personalize interaction with users of assistance platforms by offering the most relevant support options [13]. This greatly facilitates the search for appropriate programs and helps to increase the number of engaged participants.

Data privacy is a key issue for non-profit and charitable organizations, as they handle large amounts of personal information about donors and beneficiaries. In particular, this includes demographic information, financial data, and the history of receiving assistance or support. Using this

information to optimize processes requires compliance with ethical standards and legal regulations governing its processing and storage. Breaches of confidentiality not only undermine an organization's credibility and can have legal consequences, especially in the face of increasing cyberattacks and misuse. In this regard, organizations must implement comprehensive data protection measures and ensure transparency in the use of information (Table 2).

Table 2 – Main categories of data and risks of confidentiality violation in charitable organizations

Data category	Purpose of processing in charitable organizations	The main privacy risks
Personal data of beneficiaries	Registering, identifying needs, providing assistance	Improper storage or leakage of data
Data on benefactors	Donation accounting and reporting	Use without the owner's consent
Medical data	Providing specialized care	Unauthorized access or transfer
Financial information	Maintaining financial statements	Unsecured transactions and fraud
Demographic information	Statistical analysis and program planning	Misuse of data for targeting

Source: compiled by the author based on [3; 16; 17].

In practice, ensuring data confidentiality in nonprofit organizations requires modern technological solutions, regular monitoring, and implementation of information security policies. For example, the SpivDiya platform [15] pays special attention to multi-level data encryption and multi-factor user authentication, which can significantly reduce the risk of unauthorized access. In addition, restricting access rights for employees depending on their responsibilities prevents accidental information leaks and minimizes the risk of internal threats. An important aspect is compliance with the data minimization policy, which provides for processing only the information that is directly necessary to perform a specific task.

A special category is medical data, which requires increased protection due to its confidential nature. In programs like the International Committee of the Red Cross [18], data on the health status of people receiving assistance is processed in compliance with international security standards. For this purpose, regular audits of information systems are conducted to identify vulnerabilities and implement security updates promptly.

Financial information is also sensitive, as fraudulent activities or improper storage of payment data can lead to a loss of trust from donors. In this context, Ukrainian fundraising platforms that use secure protocols to process financial transactions can serve as an example. For example, the United24 platform [19] ensures transparency of financial transactions through integration with international payment systems that are certified according to PCI DSS (Payment Card Industry Data Security Standard) [20]. This ensures high confidence in the activities and transparency of reporting for donors.

Demographic information is used for planning support programs and statistical analysis of performance. However, there is a risk that this data may be used for targeting in unintended ways that may raise questions about the ethics of the organization's activities. To minimize these risks, it is important to ensure that datasets are anonymized before processing and to limit access to aggregate reports by third parties.

Algorithmic explainability and accountability are important elements of using AI systems in nonprofit and charitable organizations, especially when it comes to making decisions that affect access to care or resource allocation. "Black boxes" are algorithms whose working principles remain opaque to users and even developers, making it difficult to control and verify the validity of the results. Lack of transparency can lead to situations where decisions made by an AI system are biased or unfair, but the reasons for this remain unclear. Algorithmic explainability mechanisms make the decision-making process understandable and transparent, which increases trust in the systems and allows for auditing the results to prevent errors (Table 3).

Table 3 – Mechanisms of algorithmic explainability and their practical application in decision-making

Approach to ensuring explainability	Description of the mechanism	Practical application
Linear model	Use of algorithms with a transparent structure and clear links between input and output data	Used in predicting small data sets for social surveys

Methods of informed decisions	Integration of interpretive models for analyzing the work of complex algorithms	They are used to explain the work of deep neural networks in decision support systems
Visualization of results	Creating graphs and charts to display key factors that affect the result	Used in reports to present data on the results of charitable programs
Artificial examples (counterfactuals)	Analysis of alternative scenarios to assess the impact of variables	Used in simulations to test the impact of various indicators on decisions
Artificial examples (counterfactuals)	Analysis of alternative scenarios to assess the impact of variables	Used in simulations to test the impact of various indicators on decisions

Source: compiled by the author based on [5; 21].

In the current context, explanation mechanisms are actively used to increase the credibility of AI systems in charity programs. For example, UN humanitarian aid projects [22] use decision support systems with built-in explanation modules that allow analysts to understand what factors influenced the selection of priority regions for assistance. This allows them to check whether the socioeconomic characteristics of the regions are taken into account and whether automatic biases have been introduced.

The use of results visualization methods is especially common in reports of large organizations such as the Red Cross [23], where program performance indicators are presented in the form of charts and diagrams that illustrate the factors that influenced the allocation of resources. This allows beneficiaries and donors to better understand the logic of allocation and decision-making processes.

Regular algorithm audits ensure that errors in the systems can be identified. For example, social assistance platforms in Ukraine conduct independent algorithm audits to prevent potential failures and identify signs of discrimination in access to programs.

Thus, algorithm explainability and responsibility are not only technical requirements but also ethical standards that allow organizations to maintain transparency and user trust in artificial intelligence systems. Effective implementation of these mechanisms strikes a balance between automating decisions and preserving social justice.

Digital inclusion is key to ensuring equal access to charitable programs for socially vulnerable groups. In today's rapidly digitalizing society, technological solutions must be accessible to all users, including the elderly, people with disabilities, and internally displaced persons. Lack of proper access to information resources and digital tools can significantly limit the ability of these groups to receive assistance. The main challenges to digital inclusion are insufficient technical means, low digital literacy, and lack of adapted services for people with specific needs.

To analyze the main factors that influence digital inclusion in the context of charitable programs, we summarize the data in Table 4.

Table 4 – Aspects of digital inclusion and approaches to ensuring equal access to charitable services

Digital inclusion factor	Manifestation in access to charitable programs	Recommended approaches to removing barriers
Access to the Internet and devices	Lack of a computer or smartphone limits the ability to participate in programs	Providing free access to technical facilities in support centers
Digital literacy	Low level of knowledge about using online platforms	Conducting trainings on the use of digital services
Adaptation of interfaces	Inaccessibility of resources for people with visual and hearing impairments	Using audio and subtitles in services
Language adaptation	Lack of information in several languages limits access for foreigners and national minorities	Implementation of multilingual user interfaces
Remote access	Lack of programs for those living in remote regions	Development of specialized platforms with minimum requirements for Internet speed

Source: compiled by the author based on [6; 7].

In practice, digital inclusion in charitable programs requires integrating adapted solutions for all population categories. For example, the Help.ua platform [24], which coordinates humanitarian support during crises, has introduced a simple and intuitive interface with adaptations for users of different ages. The service also provides the possibility of telephone consultations for those with limited access to the Internet or insufficient digital literacy. In addition, the organization conducts specialized training webinars for civic activists and volunteers, reducing technical barriers to attracting new participants.

International organizations' experiences also demonstrate the importance of adapting services. For example, the ReliefWeb platform [25], which supports UN humanitarian projects, offers multilingual interfaces and a search function with audio descriptions for visually impaired people. This provides access to information for users living in different countries and with different needs.

Language adaptation is especially important in regions with multiethnic populations. Some EU humanitarian aid programs use chatbots that support multiple languages, allowing users to be consulted in their native language. This facilitates more effective communication and reduces the risk of misunderstanding critical information.

Developing recommendations for introducing ethical standards for using artificial intelligence in non-profit organizations is an important step in ensuring social responsibility, security, and public trust. International experience shows that effective use of AI is possible only if the principles of transparency, inclusiveness, and respect for user rights are observed. One of the key requirements is the creation of mechanisms for regular auditing of algorithms that allow checking the validity of decision results and identifying possible biases. Such measures are necessary to avoid automated errors that could lead to discrimination against certain groups of users or inaccurate allocation of resources.

Implementing a multi-layered user data protection system is also key to maintaining trust. This includes technical security measures such as encryption and multi-factor authentication, the development of a clear privacy policy, and a transparent system for notifying users of data processing. The experience of international organizations such as the Red Cross and the UN shows that transparency in data collection and use policies helps to reduce mistrust and increases users' willingness to participate in support programs.

One effective approach is to apply the principle of "explainable AI," which provides a clear explanation of algorithms to users and internal auditors of the organization. For example, many humanitarian projects integrate modules that allow presenting information on which parameters were key in decision-making. This increases the transparency of activities and allows for a faster response to potential problems in the functioning of systems.

Implementing measures to ensure inclusiveness is also important, which involves adapting algorithms to the needs of different social groups and regions. This requires taking into account cultural, linguistic, and economic peculiarities and providing users with access to training materials on how to use the services. Successful international practices show that the introduction of multilingual interfaces and the creation of accessible instructions significantly extend the reach of programs and promote more effective communication with beneficiaries.

Finally, an important aspect is to ensure that organizations are held accountable for AI effectiveness. This involves conducting regular reviews of system performance and reporting the results to stakeholders. Adherence to international standards such as ISO 27001 [26] and GDPR [27] allows for a balance between security and program efficiency. Thus, the introduction of ethical standards for the use of artificial intelligence is a complex process that requires an interdisciplinary approach and regular monitoring to increase the transparency and responsibility of organizations in the nonprofit sector.

Conclusions and Prospects for Further Research. It has been established that using artificial intelligence in non-profit and charitable organizations significantly increases resource management efficiency and optimization of communications with beneficiaries but is accompanied by numerous ethical challenges. The main problems are the lack of transparency of algorithms ("black boxes"), the risks of data privacy violations, and restrictions on access to digital services for socially vulnerable groups. It was found that insufficient attention to digital inclusion can lead to discrimination and unequal access to programs. It is recommended that international ethical standards, such as GDPR and ISO 27001, be implemented to regulate data processing and develop transparent decision-making algorithms. It is proposed that explainable AI models and multilingual interfaces be used, as well as integrate tools for regular auditing of algorithms to check their effectiveness and reduce the risk of automatic errors. Prospects for further research include creating hybrid solutions to adapt algorithms to the needs of local communities, developing digital literacy education programs for socially vulnerable groups, and the study of the impact of digital tools on trust in humanitarian programs. Particular attention should be paid to improving data anonymization methods and ensuring the fairness of algorithmic solutions globally.

References:

1. Chyzhmar K., Dniprov O., Korotiuk O., Shapoval R., Sydorenko O. State Information Security as a Challenge of Information and Computer Technology Development. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 819-828. URL: [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3\(8\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3(8)) (date of access: 02.01.2025).

2. Floridi L., Cowls J., Beltrametti M. et al. AI4People-An Ethical Framework for a Good AI Society: Opportunities, Risks, Principles, and Recommendations. *Minds & Machines*. 2018. Vol. 28. P. 689-707. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9482-5>.
3. Mittelstadt B. Principles alone cannot guarantee ethical AI. *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1, no. 11. P. 501–507. URL: <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0114-4> (date of access: 16.01.2025).
4. Jobin A., Ienca M., Vayena E. The global landscape of AI ethics guidelines. *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1, no. 9. P. 389–399. URL: <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0088-2> (date of access: 16.01.2025).
5. Cath C. Governing artificial intelligence: ethical, legal and technical opportunities and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2018. Vol. 376, no. 2133. P. 20180080. URL: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0080> (date of access: 16.01.2025).
6. Bopp C., Harmon E., Volda A. Disempowered by Data. *CHI '17: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver Colorado USA. New York, NY, USA, 2017. URL: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025694> (date of access: 16.01.2025).
7. Elamin M. O. I. Modernizing the Charitable Sector through Artificial Intelligence: Enhancing Efficiency and Impact. *Journal of Ecohumanism*. 2024. Vol. 3, No. 4. P. 3426-3443. URL: <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1273443> (date of access: 16.01.2025).
8. Yang C., Yang Y., Zhang Y. Understanding the impact of artificial intelligence on the justice of charitable giving: The moderating role of trust and regulatory orientation. *Journal of Consumer Behaviour*. 2024. Vol. 23, no. 5. P. 2624-2636. URL: <https://doi.org/10.1002/cb.2365> (date of access: 16.01.2025).
9. Arango L., Singaraju S. P., Niininen O. Consumer Responses to AI-Generated Charitable Giving Ads. *Journal of Advertising*. 2023. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1080/00913367.2023.2183285> (date of access: 16.01.2025).
10. Goodman C. W., Chalmers K. Predictive Tools in Charity Care—Revenue vs Access. *JAMA Internal Medicine*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2024.3564> (date of access: 16.01.2025).
11. How Human–Chatbot Interaction Impairs Charitable Giving: The Role of Moral Judgment / Y. Zhou et al. *Journal of Business Ethics*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/s10551-022-05045-w> (date of access: 17.01.2025).
12. Binns R. Fairness in Machine Learning: Lessons from Political Philosophy. *Proceedings of the 2018 Conference on Fairness, Accountability and Transparency*. PMLR, 2018. P. 149-159. URL: <https://proceedings.mlr.press/v81/binns18a.html> (date of access: 17.01.2025).
13. AI Ethics: An Empirical Study on the Views of Practitioners and Lawmakers / A. A. Khan et al. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2023. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1109/tcss.2023.3251729> (date of access: 16.01.2025).
14. Eubanks V. Automating Inequality: How High-Tech Tools Profile, Police, and Punish the Poor. *St. Martin's Press*. 2018. URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=pn4pDwAAQBAJ>. (date of access: 16.01.2025).
15. SpilDiya. Official website. URL: <https://spivdiia.org.ua/> (date of access: 16.01.2025).
16. Noble S. U. Algorithms of Oppression: How Search Engines Reinforce Racism. New York University Press. 2018. URL: <https://doi.org/10.18574/nyu/9781479833641.001.0001> (date of access: 16.01.2025).
17. From What to How: An Initial Review of Publicly Available AI Ethics Tools, Methods and Research to Translate Principles into Practices / J. Morley et al. *Science and Engineering Ethics*. 2019. Vol. 26, no. 4. P. 2141–2168. URL: <https://doi.org/10.1007/s11948-019-00165-5> (date of access: 16.01.2025).
18. International Committee of the Red Cross. ICRC and Data Protection. URL: <https://www.icrc.org/en/icrc-and-data-protection> (date of access: 11.01.2025).
19. United24. Official website. URL: <https://u24.gov.ua> (date of access: 16.01.2025).
20. Payment Card Industry Security Standards Council. PCI DSS Standards. URL: <https://www.pcisecuritystandards.org/standards/> (date of access: 11.01.2025).
21. Ryan M., Stahl B. C. Artificial intelligence ethics guidelines for developers and users: clarifying their content and normative implications. *Journal of Information, Communication and Ethics in Society*. 2020. Ahead-of-print, ahead-of-print. URL: <https://doi.org/10.1108/jices-12-2019-0138> (date of access: 16.01.2025).
22. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). Official website. URL: <https://www.unocha.org/> (date of access: 11.01.2025).
23. International Committee of the Red Cross (ICRC). Official website. URL: <https://www.icrc.org/> (date of access: 11.01.2025).
24. Help.ua. Official website. URL: <https://help.gov.ua/> (date of access: 11.01.2025).
25. ReliefWeb. Official website. URL: <https://reliefweb.int/> (date of access: 11.01.2025).
26. ISO/IEC 27001. Information Security Management Systems. URL: <https://www.iso.org/isoiec-27001-information-security.html> (date of access: 11.01.2025).
27. General Data Protection Regulation (GDPR). Official website of the European Union. URL: <https://gdpr-info.eu/> (date of access: 11.01.2025).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-07>

УДК 681.3

Буяло Олексій Васильович, к.т.н., с.н.с.

<https://orcid.org/0000-0002-8848-864X>

Зайцев Олександр Вікторович, д.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2475-3800>

Воєнна академія імені Євгенія Березняка, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ БІБЛІОТЕК В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ВИЩИХ ВІЙСЬКОВИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

Буяло О.В., Зайцев О.В. Аналіз можливостей використання цифрових бібліотек в освітньому процесі вищих військових навчальних закладів. У статті проведено аналіз можливостей використання цифрових автоматизованих бібліотечних інформаційних систем (ЦАБІС) з відкритим кодом у вищих військових навчальних закладах (ВВНЗ). Розглянуто еволюцію таких систем, від їхнього становлення до сучасних рішень. Особливу увагу приділено аналізу популярних програмних платформ, зокрема Koha, Evergreen, OpenBiblio, PMB, NewGenLib. Описано їх функціональні можливості, критерії вибору та порівняльні переваги для військових навчальних установ. Зокрема, визначено, що система Koha виділена як найбільш перспективна завдяки її перевагам: відкритому вихідному коду, можливістю розгортання в локальних мережах, підтримкою різних мов інтерфейсу та постійному оновленню електронного контенту. Визначено, що впровадження ЦАБІС є ключовим етапом у створенні мережевого середовища для доступу до електронних ресурсів, особливо в умовах воєнного часу. Це сприяє підвищенню ефективності освітнього процесу, зниженню матеріальних витрат та пришвидшенню впровадження результатів наукових досліджень. У статті запропоновано критерії оцінювання ЦАБІС, серед яких операційна система, доступність налаштувань, можливість роботи в умовах обмежень. У підсумку зроблено висновок про доцільність використання Koha для ВВНЗ, з огляду на її універсальність і функціональність. Заплановано подальше тестування та формування рекомендацій для оптимізації роботи системи у військових навчальних закладах.

Ключові слова: автоматизовані бібліотечні інформаційні системи, система управління, електронний ресурс, відкритий код, військовий навчальний заклад, Koha, каталогізація, доступність, локальна мережа, інтегровані бібліотечні системи.

Buialo O., Zaitsev O. Analysis of the Possibilities of Using Digital Libraries in the Educational Process of Higher Military Educational Institutions. The article presents an analysis of the potential use of digital automated library information systems (DALIIS) with open source code in higher military educational institutions (HMEIs). The evolution of such systems is examined, from their inception to modern solutions. Special attention is given to the analysis of popular software platforms, including Koha, Evergreen, OpenBiblio, PMB, and NewGenLib. Their functional capabilities, selection criteria, and comparative advantages for military educational institutions are described. Specifically, it is noted that the Koha system stands out as the most promising due to its advantages: open-source code, the ability to deploy in local networks, support for multiple interface languages, and the continuous updating of electronic content. It is established that the implementation of DALIIS is a key step in creating a network environment for accessing electronic resources, especially in wartime conditions. This contributes to enhancing the effectiveness of the educational process, reducing material costs, and accelerating the implementation of scientific research outcomes. The article proposes criteria for evaluating DALIIS, including the operating system, accessibility of settings, and the ability to operate under restrictions. The conclusion is drawn that the use of Koha in HMEIs is advisable, considering its versatility and functionality. Further practical testing and the formulation of recommendations for optimizing the system's performance in military educational institutions are planned.

Keywords: automated library information systems, management system, electronic resource, open source, military educational institution, Koha, cataloging, accessibility, local network, integrated library systems.

Постановка завдання. У сучасних умовах цифровізації освіти важливим завданням є забезпечення доступу до якісних інформаційних ресурсів для підготовки фахівців у вищих військових навчальних закладах (ВВНЗ). Одним із ключових інструментів у цьому напрямку є цифрові бібліотеки, які дозволяють оптимізувати освітній процес, покращити доступність навчальних матеріалів і сприяти впровадженню сучасних технологій. Завданням дослідження є визначення можливостей використання цифрових бібліотек у ВВНЗ, аналіз їх функціональних переваг і недоліків, а також формулювання рекомендацій щодо інтеграції цих рішень у освітній процес.

Аналіз досліджень. Аналіз літератури показує, що цифрові бібліотеки відіграють значну роль у модернізації освітнього процесу. Вітчизняні та зарубіжні дослідники акцентують увагу на перевагах цифрових бібліотек, таких як зручність доступу, можливість роботи в дистанційному форматі, інтеграція з навчальними платформами та економія ресурсів. Зокрема, дослідження демонструють, що у військовій освіті цифрові бібліотеки сприяють підвищенню рівня підготовки курсантів і забезпечують доступ до актуальної інформації навіть в умовах обмежень. Проте, існують проблеми, пов'язані з вибором програмного забезпечення, забезпеченням безпеки даних і

адаптацією систем до специфічних потреб ВВНЗ.

Метою статті є дослідження можливостей використання цифрових бібліотек у вищих військових навчальних закладах, аналіз їх функціональних можливостей, а також розробка рекомендацій щодо їх впровадження для покращення освітнього процесу і наукової діяльності.

Виклад основного матеріалу. До комп'ютеризації бібліотечні завдання виконувалися вручну. Співробітники вручну каталогізували джерела та індексували їх за допомогою системи карткового каталогу. Рання механізація з'явилася в 1936 році, в Техаському університеті почали використовувати систему перфокарт для управління обігом бібліотеки. З появою стандартів MARC (machine-readable cataloging) у 1960-х роках, що збіглося з розвитком комп'ютерних технологій – народилася автоматизація бібліотек. З цього моменту бібліотеки почали експериментувати з комп'ютерами, і, починаючи з кінця 1960-х і продовжуючи до 1970-х років, на ринок вийшли бібліографічні послуги, що використовують нові он-лайн технології та спільний стандарт MARC. До перших автоматизованих бібліотек належали Online Computer Library Center (OCLC) (1967), дослідницька бібліотечна група (яка згодом об'єдналася з OCLC) і бібліотечна мережа Вашингтона (яка стала Western Library Network і тепер також є частиною OCLC) [1].

Першою машинно-орієнтованою системою бібліографічного зберігання та пошуку була Intrex, яка зберігала каталог із приблизно 15 000 журнальних статей та проходила тестування в інженерній бібліотеці Массачусетського технологічного інституту. Її використовували для розробки та тестування концепцій автоматизації бібліотек.

1970-ті роки з'явилися "системи під ключ" на мікрокомп'ютерах, більш відомі як інтегровані системи управління бібліотекою, нині - ЦАБІС. Ці системи включали необхідне апаратне та програмне забезпечення, яке дозволяло підключати основні завдання з обігу, включаючи контроль за обігом і прострочені повідомлення. У міру розвитку технології інші бібліотечні завдання також можна було виконувати за допомогою ЦАБІС, включаючи придбання, каталогізацію, резервування назв і моніторинг серійних видань.

З еволюцією Інтернету протягом 1990-х і в 2000-х роках ЦАБІС почали дозволяти користувачам активніше взаємодіяти зі своїми бібліотеками через online public access catalog (OPAC) - каталог публічного доступу, та он-лайнні веб портали. Користувачам надається право входити у свої бібліотечні облікові записи, щоб зарезервувати або поновити книги, а також авторизуватися для доступу до онлайнних баз даних бібліотеки

До кінця 2000 року постачальники ЦАБІС збільшили не лише кількість пропонованих послуг, але й ціни на них, оскільки розробки таких систем мали комерційний характер, а програмні реалізації були власністю розробника. Замовити автоматизацію послуг бібліотечних справ було можливо тільки великим бібліотекам. Зростання цін призвело до певного невдоволення багатьох малих бібліотек. У той же час починається розробка та тестування ЦАБІС з відкритим кодом, ці реалізації були доступні всім. Деякі бібліотеки почали звертатися до розробників ЦАБІС з відкритим кодом. Найпоширеніші причини: уникнути прив'язки до постачальника, уникнути ліцензійних зборів, можливість взяти участь у розробці програмного забезпечення. Свобода від постачальників також дозволяла бібліотекам визначати пріоритетність потреб відповідно до терміновості, на відміну від того, що може запропонувати їх постачальник [2].

Бібліотеки, які перейшли на ЦАБІС з відкритим вихідним кодом, виявили, що постачальники тепер більш схильні надавати якісні послуги для продовження партнерства, оскільки вони більше не мають права володіти програмним забезпеченням ЦАБІС і зв'язувати бібліотеки суворими контрактами. Так було з консорціумом SCLENDS, державна бібліотека Південної Кароліни разом з деякими місцевими публічними бібліотеками сформували спільноту, щоб поділитися електронними ресурсами та скористатися перевагами відкритого вихідного коду. Лише через 2 роки після початку діяльності SCLENDS, до консорціуму приєдналися 13 систем публічних бібліотек у 15 країнах.

З використанням хмарних систем, керування бібліотеками набуває нових перспектив. Згідно з відомостями від Національного інституту стандартів і технологій (NIST), хмарні технології дозволяють вдосконалити, масштабувати та надійно захистити систему управління та процес розгортання АБІС.

В зв'язку з великою різноманітністю та постійним розвитком сучасного програмного забезпечення з відкритим кодом для реалізації ЦАБІС(табл.1.) виникає потреба у розумінні підходів у побудові таких систем, та виділенні окремих критеріїв для формування пропозицій по використанню конкретних програмних рішень у ВВНЗ.

ЦАБІС зазвичай складається з реляційної бази даних, програмного забезпечення для взаємодії з цією базою даних і двох графічних інтерфейсів користувача (один для клієнтів, інший для персоналу). Більшість ЦАБІС розділяють функції програмного забезпечення на окремі програми, які називаються модулями, кожен з яких об'єднаний уніфікованим інтерфейсом. Приклади модулів можуть включати:

- придбання (замовлення, отримання та виставлення замовлень);
- каталогізація (класифікація та індексація матеріалів);
- тираж (видача матеріалів користувачам і отримання їх назад);
- серіали (відстеження журналів і газетних фондів);
- онлайн-каталог публічного доступу або OPAC.

Кожен користувач і кожен елемент мають унікальний ідентифікатор у базі даних, що дозволяє ЦАБІС відстежувати їх взаємодію [3].

Таблиця 1. Сучасне програмне забезпечення для реалізації цифрових автоматизованих бібліотечних інформаційних систем

Програмне забезпечення	Розробник	Рік випуску	Рік останнього стабільного випуску	Мова розробки	Кількість користувачів	Ліцензія
Koha	Спільнота Коха	2000 рік	2023 рік	Perl, JavaScript, HTML	4257	GPL-3.0 або новішої версії
Evergreen	Служба публічної бібліотеки Джорджії (GPLS)	2006 рік	2021 рік	Perl, C, XUL	1800	GPL-2.0 або новішої версії
PMB	Команда розробки PMB	2002 рік	2022 рік	PHP	2000	CECILL-2.0
OpenBiblio	Команда розробників OpenBiblio	2002 рік	2018 рік	PHP	No data	GPL-2.0 або новішої версії
NewGenLib	Verus Solutions	2005 рік	2015 рік	Java	No data	GPL

Koha – це одна з найдосконаліших безкоштовних ЦАБІС із відкритим кодом. Запроваджена у 1999 році, Koha використовується тисячами бібліотек по всьому світу. Серверна частина розгорнута на ОС Linux. Підтримує 26 мов інтерфейсу. Користувачі цінують це програмне забезпечення за простоту та широкий набір функцій налаштування. Програмне забезпечення життєздатне, масштабоване та ідеальне для всіх видів бібліотек. Експлуатується в 22 організаціях України.

Модулі Koha включають: каталог, OPAC, тираж, керування користувачами та пакет придбань. Програмне забезпечення широко використовується малими та великими публічними бібліотеками, приватними бухгалтерами, компаніями, школами та університетами. Це рішення може бути встановлене на автоматизованих системах класу 2 та використовуватися в підрозділах що забезпечують обмежений доступ до інформації. Дана ЦАБІС може бути використана як електронна бібліотека для ВВНЗ.

Evergreen – це безкоштовне програмне забезпечення для керування бібліотеками з відкритим вихідним кодом, яке використовується майже 2000 бібліотеками в усьому світі, пропонує інтерфейс

публічного каталогу разом із функціями, що спрощують та допомагають користувачам у формуванні запиту. Дане рішення підходить для бібліотек будь-якого розміру, від малих до середніх, великих та складних. Серверна частина розгорнута на ОС Linux. Підтримує одну мову інтерфейсу – англійську. Програмне забезпечення було вперше розроблено системою публічної бібліотеки Джорджії ще в 2006 році, і спільнота зростає, а програмне забезпечення постійно розвивається, щоб задовольнити потреби користувачів.

OpenBiblio – це проста у користуванні система автоматизації бібліотек, доступна як безкоштовний інструмент із технологією відкритого коду. Програмне забезпечення можна використовувати як інтегровану систему керування бібліотекою для керування робочими процесами та ресурсами бібліотеки.

РМВ – це безкоштовне інтегроване рішення для керування бібліотекою. На даний момент програмне забезпечення має близько 2000 клієнтів; Версія 4.2 РМВ користується великим успіхом серед користувачів. Засноване у 2004 році, РМВ широко застосовується бібліотеками та центрами документації як багатофункціональне рішення для керування бібліотекою. Серверна частина працює на ОС Linux, Windows, Mac OS. Підтримує 7 мов інтерфейсу

Унікальність РМВ також включає інструмент керування документами, який полегшує створення всіх типів записів. Його остання версія 5.0 також має можливість експортувати інформацію з цифрових документів. Це також дозволяє експортувати список пропозицій. РМВ спочатку було ліцензовано за GNU General Public License, що забезпечує вільний доступ до програмного забезпечення. Тепер РМВ ліцензовано за безкоштовною ліцензією CECILL, яка забезпечує правову безпеку у Франції та інших країнах із подібними правовими системами.

NewGenLib ідеально підходить як для малих, так і для великих бібліотек, NewGenLib – це інтегроване рішення для керування бібліотекою, розроблене таким чином, щоб користувачі були в центрі уваги. Програмне забезпечення є масштабованим і дуже ефективним. Серверна частина може бути розгорнута на ОС Linux та Windows.

З програмним забезпеченням NewGenLib зручніше відстежувати товари, відвідувачів і рахунки. Усі модулі NewGenLib повністю веб орієнтовані. Програмне забезпечення відповідає міжнародним стандартам. NewGenLib популярний завдяки своїй здатності працювати відповідно до привілеїв клієнтів. Розширені функції керування бібліотекою можуть бути придбані за певну плату.

Отже, аналізуючи наведені дані стає можливим сформулювати ряд критеріїв та обрати певну ЦАБІС для бібліотек ВВНЗ. Перший, це операційна система для розгортання програмного забезпечення ЦАБІС і такою ОС є Linux, як система з відкритим кодом. Другий - поширеність та схвальні відгуки від користувачів. Третій – наявність різних мов інтерфейсу для певних налаштувань. П'ятий – використання ЦАБІС в умовах обмежень – використання на рівні локальної мережі та відсутності доступу до Інтернету. Шостий – поповнення навчального фонду в умовах обмежень [4].

Розглянемо основні переваги Kooha порівняно з деякими іншими популярними технічними рішеннями ЦАБІС:

У порівнянні з ЦАБІС на основі Evergreen (служба публічних бібліотек Джорджії, США) ЦАБІС на основі Kooha має ширший спектр функціональних можливостей, включаючи модулі каталогізації, управління комплектуванням, циркуляцію та звітність; демонструє більшу гнучкість та легкість у налаштуванні, що дозволяє адаптувати систему під конкретні потреби бібліотек; має більш розвинену спільноту користувачів та розробників, що забезпечує регулярні оновлення та якісну технічну підтримку.

У порівнянні з ЦАБІС на основі РМВ (команда розробки РМВ, Франція) ЦАБІС на основі Kooha пропонує детальніший та більш інтуїтивний інтерфейс користувача, спрощуючи роботу персоналу бібліотек; має більш потужні можливості управління користувачами, включаючи гнучке налаштування прав доступу; забезпечує кращу підтримку міжнародних бібліотечних стандартів, таких як MARC21 та UNIMARC.

У порівнянні з ЦАБІС на основі OpenBiblio (команда розробників OpenBiblio) Kooha має ширші можливості каталогізації, управління комплектуванням та статистики, роблячи її більш комплексним рішенням; підтримує локалізацію інтерфейсу на 26 мов, що дозволяє використовувати її в багатомовному середовищі; демонструє вищу надійність та продуктивність завдяки використанню сучасних технологій, таких як Linux, Apache, MySQL/MariaDB.

У порівнянні з ЦАБІС на основі NewGenLib (Veru Solutions, Індія) ЦАБІС на основі Kooha має більш активну та розвинену спільноту користувачів та розробників, що забезпечує швидшу

реакцію на потреби та запити; пропонує ширший набір інструментів для управління бібліотечними процесами, включаючи модулі каталогізації, циркуляції, комплектування та звітності; має гнучку систему налаштування прав доступу та інтеграції з іншими інформаційними системами, що робить її більш універсальною.

Аналіз показав що, ЦАБІС на основі Koha має у своєму складі комплексний набір інтегрованих модулів, що охоплюють усі аспекти бібліотечної діяльності. Основні можливості системи включають:

Каталогізацію. Підтримку міжнародних стандартів MARC21 та UNIMARC для створення та управління бібліографічними записами.

Можливість імпортування готових бібліографічних даних із зовнішніх джерел.

Гнучка система редагування та збереження бібліографічних даних [5].

Публічний електронний каталог (OPAC). Забезпечення веб-доступу до електронного каталогу для користувачів.

Розширені можливості пошуку за ключовими словами, авторами, назвами та іншими параметрами. Налаштування інтерфейсу відповідно до потреб конкретної бібліотеки.

Управління фондами та екземплярами. Автоматизацію процесів видачі, повернення та резервування бібліотечних матеріалів. Контроль штрафів, нагадувань та статусу доступності примірників. Ведення детального обліку наявних екземплярів.

Керування користувачами. Ведення повних профілів користувачів із деталізованою інформацією. Здійснення гнучкого налаштування прав доступу до різних функцій системи. Інтеграцію з іншими інформаційними системами для синхронізації даних про користувачів.

Комплектування. Планування та контроль процесів закупівлі нових бібліотечних матеріалів. Ведення фінансового обліку, пов'язаного з придбанням ресурсів. Генерація звітів для аналізу ефективності використання бюджету.

Звітність та аналітика. Автоматизоване створення різноманітних звітів про діяльність бібліотеки. Аналіз статистики відвідувань, використання ресурсів та ефективності роботи. Гнучкі інструменти фільтрації даних для формування спеціалізованих звітів.

Отже перевагами які визначають вибір Koha у якості технічного рішення для побудови ЦАБІС для використання у освітньому процесі ВВНЗ та привабливим вибором для автоматизації бібліотечної діяльності є наступні:

Відкритий код і безкоштовність. Koha є програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, що дозволяє користувачам не лише використовувати її безкоштовно, але й модифікувати відповідно до власних потреб.

Відсутність ліцензійних витрат на програмне забезпечення суттєво знижує витрати на автоматизацію бібліотечних процесів.

Мультифункціональність. Koha інтегрує всі основні аспекти бібліотечної діяльності в єдину систему, забезпечуючи ефективне управління бібліографічними даними, екземплярами, користувачами, фінансами та звітністю.

Комплексний підхід дозволяє автоматизувати широкий спектр бібліотечних процесів, підвищуючи загальну ефективність роботи.

Масштабованість. Koha легко адаптується до потреб бібліотек різного розміру - від невеликих шкільних книгозбірень до великих наукових установ.

Система здатна обслуговувати як бібліотеки з невеликими фондами, так і масштабні збірки з мільйонами примірників.

Підтримка багатьох мов. Koha підтримує понад 26 мов інтерфейсу, що дозволяє використовувати її в багатонаціональному середовищі.

Можливість локалізації системи сприяє зручності використання для персоналу та користувачів бібліотек.

Достатня у порівнянні з іншими простота в налаштуванні та використанні. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс Koha дозволяє швидко навчити персонал працювати з системою, мінімізуючи витрати на навчання. Гнучкі налаштування та адаптація системи до потреб конкретної бібліотеки значно спрощує її впровадження.

Надійність. Використання Linux як серверної платформи забезпечує високу стабільність, безпеку та продуктивність роботи Koha. Широка спільнота розробників та користувачів Koha гарантує регулярне оновлення системи, виправлення помилок та відповідність сучасним вимогам.

Послідовність впровадження Koha у освітній процес ВВНЗ може складатися з наступних

етапів.

Розгортання системи. Встановлення серверної частини Koha на платформі Linux. Налаштування бази даних (MySQL або MariaDB) та веб-сервера (Apache або Nginx). Імпорт існуючих бібліографічних записів у систему через стандартизовані формати, такі як MARC21.

Налаштування системи. Конфігурація інтерфейсу користувача та налаштування прав доступу для персоналу. Налаштування модулів відповідно до специфічних потреб конкретної бібліотеки.

Інтеграція Koha з іншими інформаційними системами для синхронізації даних.

Дослідна експлуатація. Використання модуля OPAC для забезпечення веб-доступу користувачів до бібліотечних ресурсів. Застосування модулів управління фондами та комплектування для ефективного обліку та руху бібліотечних матеріалів. Регулярний моніторинг та аналіз роботи системи через вбудовані інструменти звітності.

Підтримка та оновлення. Регулярне оновлення Koha до нових версій для отримання нових функцій і виправлення помилок. Взаємодія з активною спільнотою Koha для обміну досвідом, отримання технічної підтримки та допомоги у вирішенні проблем [6].

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз ЦАБІС для ВВНЗ виявив їх ключову роль у модернізації освіти, особливо в умовах інформаційних викликів та воєнного часу. Порівняння платформ визначило Koha як найбільш перспективну для ВВНЗ завдяки відкритості, гнучкості, локальній роботі, мовній підтримці та оновленням. Впровадження ЦАБІС Koha є ключовим кроком до сучасного інформаційно-освітнього середовища, оптимізуючи доступ до ресурсів, підвищуючи ефективність навчання, зменшуючи витрати та прискорюючи інтеграцію наукових розробок у військову освіту. Доцільність використання Koha у ВВНЗ підтверджено її універсальністю та функціональною повнотою.

Подальші дослідження будуть зосереджені на практичній реалізації та поглибленому вивченні ефективності впровадження Koha у ВВНЗ, яке включає процеси розгортання та проведення дослідної експлуатації системи для оцінки можливостей в реальних умовах та розробку методичних рекомендацій щодо впровадження, включаючи налаштування, інтеграцію та підготовку до використання. Окрему увагу необхідно приділити дослідженню впливу впровадження ЦАБІС на якісні та кількісні показники освітнього процесу, зокрема на рівень інформаційної забезпеченості навчання, задоволеність користувачів, успішність курсантів та ефективність науково-дослідної роботи.

Список бібліографічного опису

1. Оцифрування технічної документації: внутрішні виклики в Україні та міжнародний досвід. URL: <https://r2p.org.ua/en/page/otsyfruvannia-tekhnichnoi-dokumentatsii-vnutrishni-vyklyky-v-ukraini-ta-mizhnarodnyi-dosvid> (дата звернення: 10.12.2024).
2. What is Koha. URL: <https://medium.com/@kohaindiacommunity/what-is-koha-koha-is-the-first-free-and-open-source-software-library-automation-package-ils-a496c1c4516a> (дата звернення: 13.12.2024).
3. Evergreen: Flexible and Robust Integrated Library System (ILS). URL: <https://mobiusconsortium.org/evergreen> (дата звернення: 13.12.2024).
4. PMB: Open Source Integrated Library System (ILS). URL: <https://www.extradr.com/?p=30> (дата звернення: 13.12.2024).
5. OpenBiblio Documentation. URL: https://openbiblio.github.io/openbiblio_docs/root.html (дата звернення: 13.12.2024).
6. NewGenLib: An Open Source ILS for Libraries. URL: <https://librarytechnology.org/document/13150> (дата звернення: 13.12.2024).

References

1. Digitization of Technical Documentation: Internal Challenges in Ukraine and International Experience. URL: <https://r2p.org.ua/en/page/otsyfruvannia-tekhnichnoi-dokumentatsii-vnutrishni-vyklyky-v-ukraini-ta-mizhnarodnyi-dosvid> (accessed: 10.12.2024).
2. What is Koha. URL: <https://medium.com/@kohaindiacommunity/what-is-koha-koha-is-the-first-free-and-open-source-software-library-automation-package-ils-a496c1c4516a> (accessed: 13.3.2024).
3. Evergreen: Flexible and Robust Integrated Library System (ILS). URL: <https://mobiusconsortium.org/evergreen> (accessed: 13.12.2024).
4. PMB: Open Source Integrated Library System (ILS). URL: <https://www.extradr.com/?p=30> (accessed: 13.12.2024).
5. OpenBiblio Documentation. URL: https://openbiblio.github.io/openbiblio_docs/root.html (accessed: 13.12.2024).
6. NewGenLib: An Open Source ILS for Libraries. URL: <https://librarytechnology.org/document/13150> (accessed: 13.12.2024).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-08>

УДК 004.94:518.5

Добришин Юрій Євгенович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2473-9507>

Національна академія Служби безпеки України, м. Київ, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА КОДУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВНАСЛІДОК ДІЇ КІБЕРАТАК

Добришин Ю.Є. Класифікація та кодування дефектів програмного забезпечення внаслідок дії кібератак. В роботі на підставі проведеного аналізу впливу кібератак на стан працездатності автоматизованих систем та комплексів, пропонується методика класифікації та кодування дефектів пошкодженого програмного забезпечення. Методика класифікації та кодування дефектів програмного забезпечення розроблена на підставі певних характеристик та класифікаційних ознак найбільш розповсюджених кібератак та дефектів програмного забезпечення, що виникають внаслідок їх дії. В основу класифікації покладені існуючі зв'язки між пошкодженим програмним забезпеченням та можливими дефектами, що виникають внаслідок дії кібератак, а також між дефектами програмного забезпечення та способами їх виявлення та відновлення. На підставі аналізу класифікаційних ознак розроблена структура технологічного коду дефекту пошкодженого програмного забезпечення, елементами якого є певні класифікаційні ознаки. На прикладі одного з виду кібератак SQL-ін'єкція приведений практичний приклад класифікації та призначення кодів для дефектів пошкодженого програмного забезпечення, а також варіанти можливих комбінацій кодів дефектів, що можуть виникати під час дії кібератаки виду SQL-ін'єкція. З метою подальшої формалізації відновлення дефектів пошкодженого програмного забезпечення, приведений ієрархічний взаємозв'язок рівній теоретичного дерева стану атаки виду SQL-ін'єкція, що відповідає порядку класифікації та кодування. Дослідження, що були проведені, дозволяють застосовувати методику класифікації та кодування дефектів пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак для автоматизованого проектування технологічних процесів діагностики дефектів пошкодженого програмного забезпечення, а також визначення доцільності відновлення програмних модулів та рішення інших технологічних питань щодо захисту інформації.

Ключові слова: дефект пошкодженого програмного забезпечення, класифікаційні ознаки, діагностування, технологічний код, кібератака, класифікатор дефектів.

Dobryshyn Yu. Classification and coding of software defects resulting from cyberattacks. Based on the analysis of the impact of cyberattacks on the state of operability of automated systems and complexes, the article proposes a methodology for classifying and coding defects of damaged software. The methodology for classifying and coding software defects was developed based on certain characteristics and classification features of the most common cyberattacks and software defects resulting from their effects. The classification is based on existing relationships between damaged software and possible defects resulting from cyberattacks, as well as between software defects and methods for their detection and recovery. Based on the analysis of classification features, the structure of the technological code of a damaged software defect was developed, the elements of which are certain classification features. Using the example of one of the types of cyberattacks, SQL-injection, a practical example of classification and assignment of codes for defects of damaged software is given, as well as options for possible combinations of defect codes that may arise during the action of a cyberattack of the type SQL-injection. In order to further formalize the repair of damaged software defects, a hierarchical relationship equal to the theoretical state tree of the SQL injection attack type is given, which corresponds to the order of classification and coding. The studies that have been conducted allow applying the methodology for classifying and coding damaged software defects due to cyberattacks for automated design of technological processes for diagnosing damaged software defects, as well as determining the feasibility of restoring software modules and solving other technological issues related to information protection.

Keywords: damaged software defect, classification features, diagnostics, technological code, cyberattack, defect classifier.

Постановка наукової проблеми. Аналіз пошкодженого програмного забезпечення в наслідок дії різного роду кібератак свідчить про те, що процес відновлення працездатності автоматизованих систем та програмних комплексів складно формалізувати, враховуючи особливість, неповноту та суперечливості інформації, що з'являється після навмисних дій, які здійснюються за допомогою засобів електронних комунікацій. Основу забезпечення працездатності програмного забезпечення складають процеси діагностування, на базі яких у подальшому будуються технологічні операції з відновлення дефектів програмного забезпечення.

Технологія діагностування передбачає виявлення дефектів програмного забезпечення, які з'являються після дії різного роду кібератак, унаслідок наявних вразливостей у складі програмних модулів та компонентів автоматизованих систем. Тому задачі щодо виявлення, оцінки та класифікації дефектів програмного забезпечення, а також їх подальшого групування в технологічно - подібні групи відрізняється значною трудомісткістю. Окрім того складно забезпечити автоматизацію процесу відновлення пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак, тому що на теперішній час відсутні формалізовані методики опису внутрішнього змісту та взаємозв'язків окремих технологічних операцій з відновлення дефектів програмного забезпечення.

Під час виконання технологічних операцій з відновлення пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак, крім виявлення, діагностування та аналізу дефектів, важливе місце займають операції класифікації, кодування та групування дефектів програмного забезпечення в технологічно - подібні групи.

Тобто задача передбачає виконання операцій розпізнавання конкретного дефекту, а саме, виявлення набору ознак для подальшої їх класифікації та групування з метою накопичування технологічно-подібних дефектів за ознакою оптимального способу відновлення. Розв'язання вище описаної задачі потребує проведення технологічних операцій щодо аналізу дефектів програмного забезпечення, яке відновлюється внаслідок дії кібератак, а також здійснення класифікації дефектів, виконання кодування ознак дефектів та розробки так названого комплексного дефекту.

Дефект, для якого необхідно розробити технологічний процес, повинен бути представлений у виді набору ознак, які мають відповідний код. За результатами чого можливо автоматизувати процес відновлення, який передбачає віднесення дефекту до певного образу, для якого вже існує блок - схема відновлення.

Технологічний процес відновлення, який складається з блок-схеми, являє собою сукупність образів та можливих рішень. Під час автоматизації, опис дефекту відноситься до певного образу та підставі можливих варіантів для нього призначаються певні рішення стосовно відновлення. Причому для кожного варіанту необхідно придати ступінь важливості, для того щоб з множини рішень обрати оптимальний. Такій підхід передбачає проведення робіт з класифікації, кодування ознак дефектів пошкодженого програмного забезпечення та розробку, на базі вказаного, комплексної моделі дефекту з метою її використання для вибору технологічного процесу відновлення програмного забезпечення внаслідок дії кібератак.

Аналіз досліджень. Задачею технологічного процесу відновлення пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак, є визначення відповідного дефекту, тому рішення вказаної задачі базується на встановленні відповідності між різними ознаками, що характеризують в цілому дефект, та технологічними методами їх виявлення та усунення.

Різноманіттю дефектів пошкодженого програмного забезпечення, особистому досвіду та інтуїції співробітника, що виконує оцінку стану працездатності програмного забезпечення за допомогою обчислювальних засобів, протиставляється кінцеве число типів дефектів, ознак та технологічних рішень. Необхідно визначити основні типи дефектів, здійснити їх аналіз, та підставі чого розробити класифікатори, що інтерпретують відомості про дефекти з метою автоматизованого проектування процесів відновлення пошкодженого програмного забезпечення. Необхідною вимогою також є виконання досліджень щодо формалізації ознак та понять, що відносяться до опису дефектів пошкодженого програмного забезпечення. Для вирішення зазначених завдань, необхідно здійснити класифікацію дефектів пошкодженого програмного забезпечення та на її основі розробити масиви технологічних кодів дефектів.

Існуючі на теперішній час системи класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення недостатньо задовольняють можливість їх використання для автоматизації, тому потребують доопрацювання.

Аналіз наукових робіт свідчить, що до цього часу ще не розроблена універсальна система класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення, державні установи та компанії під час роботи застосовують свої власні методи класифікації шляхом розбиття дефектів пошкодженого програмного забезпечення на різні класи з подальшим групуванням.

Одними з найперших робіт, де були розроблені та описані наукові основи класифікації дефектів та помилок програмного забезпечення, були роботи закордонних та вітчизняних наукових авторів Тайера Т, Липоу М, Марєка Л, Девейна Е., Шингера Н.

В зазначених роботах класифікація дефектів програмного забезпечення базувалися на підставі основних видів діяльності, пов'язаних з життєвим циклом розробки автоматизованих систем та програмних модулів. Класифікація, кодування та прогнозування дефектів програмного забезпечення залишається актуальною і на теперішній час.

Так, декілька вітчизняних авторів [1] вважають, що дефекти програмного забезпечення необхідно класифікувати на підставі їх функціональності, наприклад, функціональні та нефункціональні. Враховуючи таку класифікацію, автори пропонують, що під час проведення діагностування дефектів програмного забезпечення, необхідно у якості основної ознаки класифікації обирати дефекти, які негативно впливають на атрибути якості програмного

забезпечення. Науковці вважають, що нефункціональний дефект може прогресувати, тому здійснення заходів з виявленням ознак нефункціональних дефектів на фазі проектування та супроводу автоматизованих систем та комплексів, є головним підходом щодо класифікації дефектів програмного забезпечення.

Дослідження класифікації дефектів програмного забезпечення приведено також у науковій роботі [2]. Авторами запропонований метод автоматичної класифікації дефектів з метою їх швидкого знаходження та відновлення. Наукові співробітники стверджують, що на теперішній час не існує автоматичної класифікації дефектів програмного забезпечення, тому розглядають та пропонують відповідні концепції щодо аналізу дефектів та їх управління, а також класифікацію дефектів програмного забезпечення, яка значно підвищить ефективність тестування програмного забезпечення та знизить вартість його обслуговування.

Деякі роботи, присвячені питанням класифікації дефектів програмного забезпечення, передбачають застосування окремих математичних моделей та методів машинного навчання. Так у науковій роботі [3] наведена методика побудови регресійної моделі щодо прогнозування появи дефектів програмного забезпечення, що відображає математичний зв'язок між щільністю дефектів та їх кількістю. Підходи, запропоновані авторами, дозволяють покращити час прогнозування дефектів та якість їх класифікації.

Інтерес представляє робота вітчизняного автора [4]. У науковій роботі приведені математичні моделі вразливостей програмного забезпечення, а також критерії класифікації дефектів програмного забезпечення, які дозволяють сформулювати правила їх класифікації. Автором також запропонований метод та механізми прогнозування появи дефектів, які можуть бути застосовані для прогнозування збоїв і вразливостей як прикладного, так і системного програмного забезпечення.

Продовженням робіт з питань аналізу дефектів програмного забезпечення та їх класифікації, є наукова робота фахівців [5]. У роботі дефекти програмного забезпечення класифікуються в залежності від ступеня їх впливу на працездатність програмного забезпечення. Дефекти програмного забезпечення класифікуються та обираються з використанням певного алгоритму, який обирається на підставі аналізу показників якості програмного забезпечення.

Авторами наукової роботи [6] здійснюється оцінка узгодженості між ознаками дефектів програмного забезпечення на підставі дослідження певних класифікаторів. У роботі ознаки дефектів розподіляються на специфічні, які належать до одного класифікатора та агностичні для іншого класифікатора. Набори даних про дефекти програмного забезпечення описуються функціями, які впливають на процес їх віднесення до певних класифікаторів.

У науковій роботі [7] приведені дослідження класифікації дефектів програмного забезпечення з використання штучного інтелекту. Під час діагностування, авторами спочатку виконується класифікація дефектів програмного забезпечення із застосуванням компонентів експертної системи, яка має певну структуру, що побудована на базі програмного забезпечення MS SQL Server та масиви дефектів програмного забезпечення. Класифікація дефектів програмного забезпечення здійснюється в автоматичному режимі шляхом визначення категорії дефектів на підставі типових ознак та логічного висновку виходячи з характеристик певного типу дефекту програмного забезпечення. За результатами діагностики дефектів програмного забезпечення робиться певний висновок щодо їх подальшої класифікації.

За висновками авторів, експериментальні результати показують, що запропонована система діагностування та класифікації дефектів програмного забезпечення з використанням штучного інтелекту суттєво перевершує точність традиційного механізму діагностування, що здійснюється без використання засобів обчислювальної техніки. Метод класифікації, який використовується у науковій роботі, на першому етапі визначає категорію дефектів програмного забезпечення за допомогою типових ознак, а далі за рахунок зменшення бази знань експертної системи, вибирає назву дефекту з числа характеристик, які належать до певного виду дефекту. Інтерес в роботі представляє база знань експертної системи. Окрім допоміжних таблиць, існує база дефектів, яка включає дві таблиці: таблицю дефектів типу керування та потоку даних та структуровану та нефункціональну таблицю дефектів.

Метод класифікації та групування дефектів програмного забезпечення, який використовує концепцію нечіткої логіки представлений у роботі [8]. Цей підхід дозволяє отримати складність, неповноту або невизначеність, що часто відображається в процесі аналізу дефектів. Метод наведений у науковій праці може бути корисним під час експлуатації складних автоматизованих

систем та комплексів. На думку авторів дефекти програмного забезпечення можуть представлятися в різних контекстах та у відмінності від класичних методів класифікації дефектів, де кожен дефект чітко потрапляє в одну з категорій, наприклад, важливий, неважливий або критичний, дефект програмного забезпечення може частково відноситися до кількох категорій (наприклад, може бути одночасно важливим і критичним, залежно від контексту). Такий методичний прийом класифікації дозволяє врахувати різні характеристики дефектів програмного забезпечення та забезпечує ітераційне їх групування з подальшим вибором оптимального способу відновлення.

У науковій роботі [9] наведені окремі методичні підходи щодо класифікації дефектів, за допомогою застосування технологічних операцій з прогнозування програмного забезпечення. Автори стверджують, що для дефектів програмного забезпечення найбільш застосовуваними є методи класифікації, які використовують елементи логістичної регресії та випадкового лісу. Підходи щодо прогнозування дефектів програмного забезпечення базуються на підставі бінарної класифікації, яка класифікує модулі програмного забезпечення на дефектний та недефектний. На думку авторів, класифікація дефектів програмного забезпечення є важливим елементом виявлення дефектів, тому в роботі визначені основні напрямки досліджень щодо методів вибору та удосконалення класифікаторів, як важливого елементу моделі виявлення дефектів.

У науковій статті [10] автори стверджують, що класифікація дефектів програмного забезпечення є головним фактором у забезпеченні його якості. Окрім цього процес класифікації дефектів, спрямований на прогнозування появи дефектів відіграє вирішальну роль під час призначення способів їх відновлення. Для прогнозування та класифікації дефектів автори пропонують застосування методів машинного навчання, на базі якого здійснюється аналіз виявлення закономірностей і взаємозв'язків між різними факторами та виникненням дефектів програмного забезпечення. Після проведення діагностування класифікація дефектів програмного забезпечення здійснюється на основі виявлених характеристик, характеру виникнення та критичності.

Колектив авторів [11] зазначає, що дефекти програмного забезпечення необхідно класифікувати відповідно до вимог та фаз розробки життєвого циклу програмного забезпечення. Цей підхід зосереджується на дефектах, що допущені на етапі розробки модулів та компонентів програм. За результатами робіт, автори представляють методіку класифікації дефектів програмного забезпечення із урахуванням помилок, що призводять до збоїв його працездатності. Ознаками класифікації дефектів виступають подібності та походження помилок за результатами розробки програмного забезпечення.

Необхідно зазначити, що аналіз літературних джерел, приведених наукових підходів, свідчить про актуальність проблеми класифікації та кодування дефектів під час розробки та супроводу програмного забезпечення. Але існуючі методіки не можуть бути у повному обсязі застосовані до класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення в умовах неповноти інформації, яка існує під час здійснення кібератак. Крім того технологія діагностування та відновлення пошкодженого програмного забезпечення суттєво відрізняється від традиційної технології, яка застосовується під час розробки та оновлення програмного забезпечення, тому що має різний склад та послідовність технологічних операцій. Проблема класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення залишається актуальною.

Мета роботи. Метою статті є вирішення проблеми щодо класифікації та кодування дефектів пошкодженого програмного забезпечення з метою розробки комплексної моделі дефекту та використання пропонованої моделі для вибору технологічного процесу відновлення пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Працездатність пошкодженого програмного забезпечення, що потребує відновлення, характеризується кортежем дефектів, які необхідно усунути.

Припустимо, що існує пошкоджене програмне забезпечення $\{P_r\}$, технічний стан якого визначається сукупністю дефектів $\{d_1...d_n\}$, і кожен дефект пошкодженого програмного забезпечення характеризується набором відповідних ознак $\{W_i\}$. Виходячи з цього можна записати:

$$\begin{aligned} & d_1(W_{11}), d_1(W_{21}), \dots, d_1(W_{k1}), \\ & d_2(W_{12}), d_1(W_{22}), \dots, d_1(W_{k2}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$d_n(W_{1n}), d_1(W_{2n}), \dots d_1(W_{kn})$$

Пошкоджене програмне забезпечення, що потребує відновленню, має один або декілька дефектів; одному та тому же дефекту відповідає один або декілька ознак.

Сукупність всіх можливих дефектів, які доповнюються певними ознаками можуть сформувати комплексний образ пошкодженого програмного забезпечення, яке описується за допомогою наступного виразу:

$$d_1(W_{11}, W_{21}, W_{k1}) \dots \dots d_n(W_{1n}, W_{2n}, W_{kn}) \quad (2)$$

Задача складається в тому, щоб здійснити розпізнавання певного пошкодженого програмного забезпечення серед теоретичні можливих комбінацій кодів комплексного образу пошкодженого програмного забезпечення з подальшим віднесенням його до певної групи, для якої вже існує відповідний технологічний процес відновлення.

Таким чином для реалізації методики класифікації дефектів під час відновлення пошкодженого програмного забезпечення, необхідно виконати:

- визначити номенклатуру пошкодженого програмного забезпечення;
- здійснити аналіз дефектів програмного забезпечення та описати їх відповідні ознаки щодо номенклатури пошкодженого програмного забезпечення;
- розробити та виконати кодування ознак дефектів пошкодженого програмного забезпечення;
- розробити комплексний образ пошкодженого програмного забезпечення, який можна описати за допомогою комбінацій кодів дефектів та їх ознак.

У даній статті пропонується класифікатор дефектів пошкодженого програмного забезпечення, який розроблений на підставі певних класифікаційних ознак. В основу класифікації покладені існуючі зв'язки між класифікаційними характеристиками кібератак, пошкодженим програмним забезпеченням та можливими дефектами, що виникають під час дії кібератак, а також між дефектами програмного забезпечення та способами їх виявлення та відновлення. Для кожного об'єкту, що приймає участь у класифікації, призначається відповідний код.

Виявлення дефектів пошкодженого програмного забезпечення під час виконання технологічних операцій діагностування потребує знання можливих класів кібератак, які можуть здійснюватися під час експлуатації програмного забезпечення. Тому першим напрямком класифікації є визначення джерела виникнення дефекту в залежності від класу кібератак $\{K_{ka}\}$, що застосовуються зловмисниками для своїх корисних дій (табл. 1).

Таблиця 1. Класи кібератак

№ з.п	Клас кібератаки	Код
1	Зовнішні	11
2	Внутрішні	12
3	Технічні	13

Але клас кібератаки не в повної мірі відображає повноту інформації, що необхідна для проведення діагностування пошкодженого програмного забезпечення та подальшого вибору технологічного маршруту відновлення дефектів, тому іншим напрямком класифікації є зазначення виду кібератаки, яка пов'язана з основними компонентами інфраструктури автоматизованих систем $\{I_s\}$ (табл.2).

Таблиця 2. Види кібератак

№ з.п	Вид кібератаки	Код
1	Фішинг (Phishing)	21
2	Рансомвар (Ransomware)	22
3	DDoS-атака (Distributed Denial of Service)	23
4	SQL-ін'єкція (SQL Injection)	24
5	Людина посередині (Man-in-the-Middle)	25
6	Крадіжка сесії (Session Hijacking)	26
7	Зловмисне програмне забезпечення (Malware)	27
8	Атаки на вразливості (Zero-Day Attacks)	28
9	Програми-шпигуни (Spyware)	29

10	Атака дистанційного доступу до ресурсів (Remote Access Trojans, RATs)	210
11	Кросс-сайт скриптинг (Cross-Site Scripting, XSS)	211
12	Соціальна інженерія (Social Engineering)	212
13	Скіммінг (Skimming)	213

Кібератаки можуть мати різноманітні причини або мотиви, що лежать в основі їхнього проведення, тому іншим напрямком класифікації буде визначення причини $\{Res_{ka}\}$, чому вказаний вид кібератаки застосовується зловмисником (табл.3)

Таблиця 3. Причини появи видів кібератак

№ з.п	Причина появи кібератаки	Код
1	Фінансова вигода	31
2	Політичні та ідеологічні мотиви	32
3	Шпигунство	33
4	Конкурентні переваги	34
5	Помста або особисті мотиви	35
6	Військові та терористичні мотиви	36
7	Тестування	37
8	Технічні помилки	38
9	Атаки, пов'язані з соціальними мережами	39
10	Хакерство заради розваги	310
11	Вразливість системи	311

Важливим напрямком класифікації є розподіл дефектів у залежності від цілей, що використовують зловмисники $\{M_{ka}\}$. До таких дефектів необхідно віднести злам системи безпеки, виток конфіденційної інформації, неавторизований доступ та зміна налаштування системи, відмова в обслуговуванні, системні збої або аварії, порушення системи моніторингу, порушення роботи з базами даних. Наприклад, кібератака може здійснюватися на апаратні компоненти серверів, пристроїв введення/виведення, систем зберігання даних, мережеві пристрої тощо (табл.4)

Таблиця 4. Ціль кібератак

№ з.п	Ціль кібератаки	Код
1	Викрадення особистих даних	41
2	Доступу до облікових записів	42
3	Вимагання грошей за повернення доступу до даних	43
4	Перевантаження системи з метою її виведення з ладу або тимчасового припинення роботи	44
5	Модифікація даних у базах даних	45
6	Викрадення даних у базах даних	46
7	Викрадення конфіденційної інформації	47
8	Шкідливе втручання в роботу системи	48
9	Використання вразливостей для отримання доступу до системи або даних	49
10	Шпигунство за користувачем	410
11	Віддалене керування комп'ютером жертви для крадіжки даних або інших зловмисних цілей	411
12	Викрадення платіжної інформації	412
13	Маніпуляція даними	413

Наступним напрямком класифікації є розподіл дефектів у залежності до типу програмного забезпечення $\{P_r\}$, наприклад, належність до системного програмного забезпечення, прикладного програмного забезпечення, а також до інструментального програмного забезпечення (табл.5).

Таблиця 5. Типи програмного забезпечення

№ з.п	Тип програмного забезпечення	Код
1	Системне програмне забезпечення	51
2	Прикладне програмне забезпечення	52

3	Інструментальне програмне забезпечення	53
---	--	----

На підставі аналізу пошкодженого програмного забезпечення були виявлені та проаналізовані основні типи дефектів $\{T_d\}$, що виникають під час дії кібератак. Перелік основних таких типів дефектів наведений у таблиці 6.

Таблиця 6. Основні типи дефекти пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак

№ з.п	Тип дефекту	Код
1	Неавторизований доступ	61
2	Зміна налаштування системи	62
3	Відмова в обслуговуванні	63
4	Нестабільність роботи системи	64
5	Збій у роботі системи	65
6	Проблеми з оновленнями системи	66
7	Порушення системи моніторингу	67
8	Порушення роботи компонентів комп'ютерної мережі	68
9	Збій системи безпеки	69
10	Некоректна обробка вхідних даних, що використовують запити	610

Для більш детальної характеристики типів дефектів та подальшого опису комплексного коду дефекту пошкодженого програмного забезпечення, здійснимо класифікацію підтипів $\{T_{pd}\}$ дефектів пошкодженого програмного забезпечення (табл. 7).

Таблиця 7. Основні підтипи дефектів пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак

№ з.п	Підтип дефекту	Код
1	Втрата контролю над системою	71
2	Вилучення критичних файлів	72
3	Зміна критичних файлів	73
4	Відсутність відповіді системи на запити	74
5	Втрата доступу до функцій системи	75
6	Системні збої у роботі програмного забезпечення	76
7	Системні аварії у роботі програмного забезпечення	77
8	Невідповідність логіки роботи програми	78
9	Витік оперативної пам'яті системи	79
10	Невірне використання процесорного часу	710
11	Порушення роботи з базами даних	711
12	Відсутність патчів безпеки	712
13	Некоректне оновлення програмного забезпечення	713
14	Зміна інформації у системних журналах	714
15	Видалення системних журналів	715
16	Порушення роботи мережевих протоколів	716
17	Порушення конфіденційності	717
18	Пошкоджена цільність даних	718
19	Порушення цільності програмного коду	719
20	Небезпека витоку даних	720
21	Виток даних	721
22	Пошкодження даних	722
23	Шифрування файлів для вимагання	723

Класифікація передбачає розподіл дефектів пошкодженого програмного забезпечення за критерієм важливості щодо їх подальшого відновлення $\{K_v\}$. Таки дефекти пропонується включати в групи: основні та неосновні. Під основними розуміють такі дефекти, які потребують обов'язкової

перевірки під час виконання технологічних операцій з діагностування та подальшого відновлення. Неосновними є такі дефекти, при яких пошкоджене програмне забезпечення може тимчасове бути експлуатоване (табл.8).

Таблиця 8. Критерій важливості дефекту пошкодженого програмного забезпечення

№ з.п.	Критерій важливості дефекту	Код
1	Основний	81
2	Неосновний	82

Дефекти, що виникають в наслідок дії кібератак, можна класифікувати за значимістю $\{Z_{ka}\}$. Наприклад, є дефекти, які суттєво впливають на надійність роботи програмного забезпечення (пошкоджена цілість даних, порушення конфіденційності інформації, порушення цілісності програмного коду), а є такі, які потребують усунення в другу чергу. Така класифікаційна ознака повинна враховуватися під час формування технологічного процесу, що визначає послідовність відновлення дефектів пошкодженого програмного забезпечення (табл.9).

Таблиця 9 Критерій значимості дефекту пошкодженого програмного забезпечення

№ з.п.	Критерій значимості дефекту	Код
1	Програмне забезпечення можна використовувати	91
2	Програмне забезпечення можна використовувати після переналадження	92
3	Програмне забезпечення можна використовувати обмежено	93
4	Програмне забезпечення можна використовувати після відновлення	94
5	Програмне забезпечення потребує заміни	95

Під час проведення діагностування дефектів пошкодженого програмного забезпечення однієї з важливих ознак класифікації є розподіл дефектів у залежності від способу їх виявлення $\{S_{vka}\}$. Таки ознаки забезпечують оптимальне використання спеціалізованого програмного та технічного забезпечення, сприяють оптимальному застосуванню операцій щодо налаштування системи моніторингу та виявлення кібератак (табл.10).

Таблиця 10. Способи виявлення дефектів пошкодженого програмного забезпечення

№ з.п.	Спосіб виявлення дефектів	Код
1	Аналіз журналів безпеки	101
2	Перевірка цілісності файлів	102
3	Аналіз трафіку мережі	103
4	Аналіз вразливостей програмного забезпечення	104
5	Тестування на проникнення	105
6	Аналіз наявності шкідливих програм	106
7	Моніторинг поведінки користувачів	107

Таким чином на підставі аналізу класифікаційних ознак розроблена структура технологічного коду дефекту пошкодженого програмного забезпечення, елементами якого є вказані класифікаційні ознаки

$$K_d = \{K_{ka}, I_s, Res_{ka}, M_{ka}, P_r, T_d, T_{pd}, K_v, Z_{ka}, S_{vka}\} \quad (3)$$

Дослідження, що були проведені за методикою, що приведена, дозволяють виконувати кодування дефектів пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак. Розроблений технологічний код необхідний для машинного проектування технологічних процесів діагностики дефектів пошкодженого програмного забезпечення, а також визначення доцільності відновлення програмних модулів та рішення інших технологічних питань щодо захисту інформації.

Фрагмент можливих комбінацій кодування дефектів, що можуть виникати під час дії кібератаки виду SQL-ін'єкція представлений на рис 1 та таблиці 11. Ієрархічний взаємозв'язок рівній теоретичного дерева стану атаки виду SQL-ін'єкція відповідає порядку кодування, який описаний раніше.

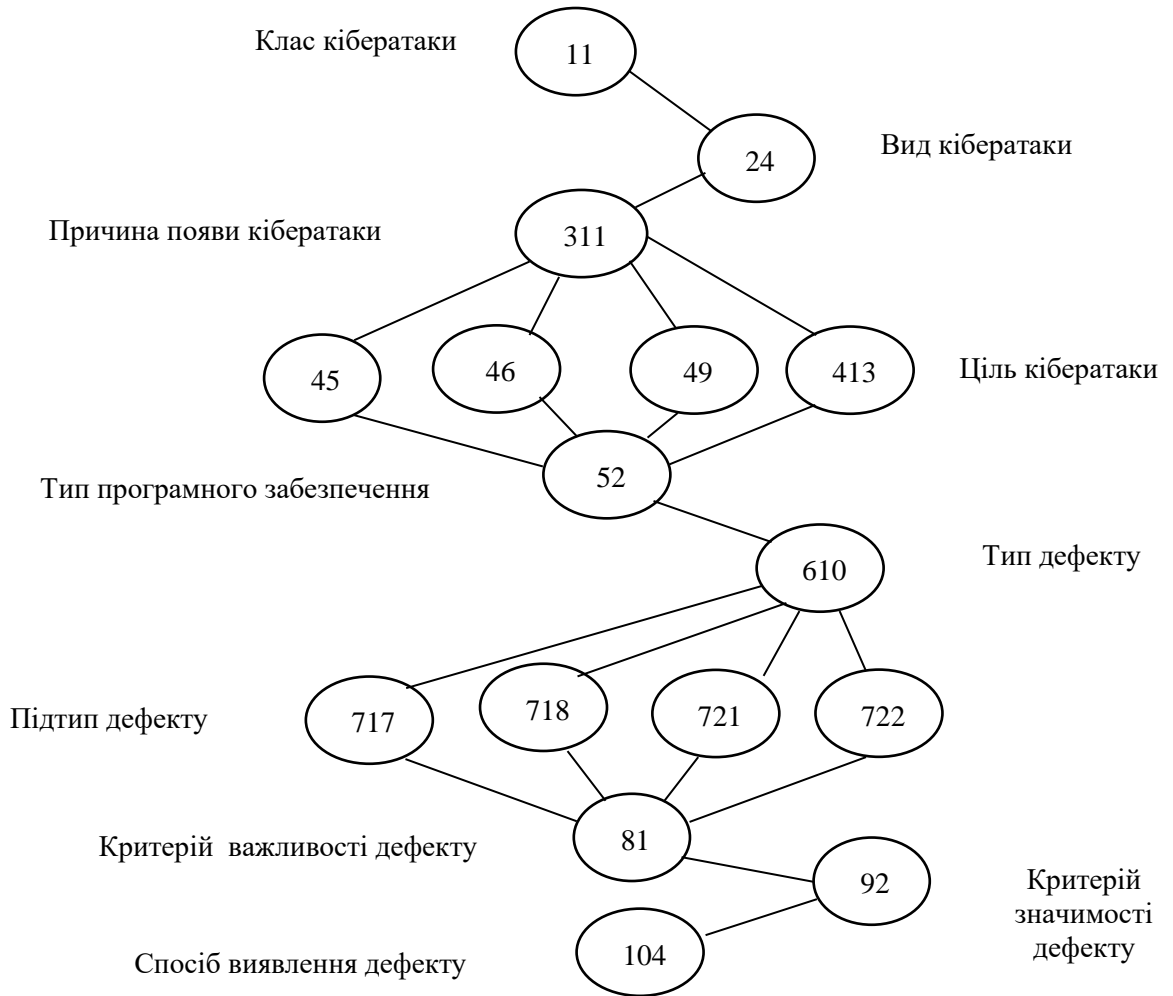


Рис.1. Теоретичне дерево стану атаки виду SQL-ін'єкція

Таблиця 11. Варіанти кодування дефектів атаки виду SQL-ін'єкція

Вид кібератаки SQL-ін'єкція			
Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
11243114552610717 8192104	11243114652610718 8192104	1124311495261072181 92104	112431141352610722 8192104

Суттєвою обставиною, яка спрощує технологічні операції класифікації дефектів є те, що для класифікації необхідно мати повний комплект зразків дефектів пошкодженого програмного забезпечення. Кожний комплект зразків характеризується набором ознак $\{PR_d\}$ та номером програми $\{NR_d\}$.

Таким чином класифікація зводиться до порівняння відповідних ознак дефекту, що діагностується, з нормативними ознаками програми, яка належить певному класу програмного забезпечення. Якщо ознаки співпадають, то зразок дефекту буде знайдений, йому буде присвоєний номенклатурний номер, який відноситься до набору ознак пошкодженого програмного забезпечення.

Наведений метод класифікації має певні недоліки:

- складність вибору стандартного набору ознак дефектів програмного забезпечення;
- постійна потреба у збільшенні кількості ознак;
- збільшення трудомісткості класифікації.

Зниження трудомісткості класифікації може бути забезпечено за рахунок збільшення кількості кроків порівняння та зменшення ознак дефекту програмного забезпечення. Тобто,

вказаний спосіб, зводиться до однієї операції порівняння та потребує $\{n\}$ ознак дефекту, необхідних та достатніх для ідентифікації пошкодженої програми за допомогою одного порівняння. Якщо використовувати для кожного порівняння одиницю ознаку, то кількість порівнянь збільшиться. Задача зводиться до вибору такого способу класифікації дефекту, який потребує мінімальних затрат під час його діагностування.

Тривалість класифікації дефекту пошкодженого програмного забезпечення можна визначити виходячи з наступного виразу:

$$T_d = T_{diag} + T_{ac} \quad (4)$$

де: T_{diag} – витрати, що присутні під час виконання операцій діагностування;

T_{ac} – час роботи автоматизованої системи, призначеної для класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення.

Витрати T_{diag} , що присутні під час виконання операцій діагностування, визначаються часом, що витрачає співробітник, який здійснює попереднє діагностування пошкодженого програмного забезпечення.

Такі витрати можливо визначити, виходячи з наступного виразу:

$$T_{diag} = \sum_{i=1}^n T_{pdk} \quad (5)$$

де: T_{pdk} - тривалість попереднього діагностування пошкодженого програмного забезпечення;

i – номер мікрооперації;

k ознака, що використовується під час класифікації.

Таким чином загальна тривалість здійснення класифікації дефектів пошкодженого програмного забезпечення визначається:

$$T_d = \sum_{i=1}^n T_{pdk} + T_{ac} \quad (6)$$

Висновки. Таким чином, дослідження, що були проведені, дозволяють застосувати методику класифікації та кодування дефектів пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак, яка передбачає порівняння відповідних ознак дефекту, що діагностується, з нормативними ознаками програми, яка належить певному класу програмного забезпечення. Суттєвою обставиною, яка спрощує технологічні операції класифікації та кодування дефектів є те, що для класифікації необхідно мати повний комплект зразків дефектів пошкодженого програмного забезпечення, який характеризується набором ознак та номером програми. На підставі запропонованої класифікації представлена структура технологічного коду дефекту пошкодженого програмного забезпечення, який може бути використаний під час автоматизованого проектування різних технологічних операцій, а також для формалізації задачі діагностики програмного забезпечення, розробки послідовності проектування технологічного процесу діагностування пошкодженого програмного забезпечення внаслідок дії кібератак.

Список бібліографічного опису

1. Шингера Н.Я., Андрійчук П.Р. (2017). Особливості дефектів програмного забезпечення, VI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій. Тернопіль, Україна.
2. Junting Gao., Liping Zhang., Fengrong Zhao., Ye Zhai. (2019). Research on Software Defect Classification, IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China.
3. Felix, E. A., & Lee, S. P. (2020). Predicting the number of defects in a new software version. PLoS ONE, 15(3). Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229131>.
4. Hovorushchenko T. (2021). Criteria and Rules for Classification of Software Failures and Vulnerabilities, The 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems. Ternopil, Ukraine
5. Akif, H. M., Reddy, R. V., Nagella, K., & Vidya, S. (2021). Software Defect Estimation Using Machine Learning Algorithms. International Journal of Recent Technology and Engineering, 10(1), 204.
6. Gopi Krishnan Rajbahadur, Shaowei Wang, Gustavo Ansaldo Oliva, Ahmed E. Hassan The Impact of Feature Importance Methods on the Interpretation of Defect Classifiers IEEE Transactions on Software Engineering PP(99), 7, January 2021 URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSE.2021.3056941> (date of access: 06.12.2024)
7. Wang H., Yuan L., (2022). Software engineering defect detection and classification system based on artificial intelligence. Nonlinear Engineering, 11 (1), 380-386.

8. Yuxiang Gao, Yi Zhu, Yu Zhao (2022). Dealing with imbalanced data for interpretable defect prediction. *Information and Software Technology*, 151(2). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950584922001410789-823>.
9. Хіль, О. С., & Яковина, В. С. (2023). Аналіз проблеми застосування методів машинного навчання для оцінювання та прогнозування дефектів програмного забезпечення. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(3), С. 110-116. URL: <https://doi.org/10.36930/40330316>
10. Charalampos M., Karanikola A., Сотиріс К. (2024). Data-Efficient Software Defect Prediction: A Comparative Analysis of Active Learning-enhanced Models and Voting Ensembles. *Information Sciences*, 676. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002002552400700X?via%3Dihub>.
11. Tushar Agrawal, Gursimran Singh Walia., Vaibhav K. Anu. (2024). Development of a Software Design Error Taxonomy: A Systematic Literature Review. *SN Computer Science*, 5. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-024-02797-2>.
12. Li, Z., Niu, J. & Jing, XY. (2024). Software defect prediction: future directions and challenges. *Autom Softw Eng* 31, 19 URL: <https://doi.org/10.1007/s10515-024-00424-1>.

References

- Shingera N.Ya., Andriychuk P.R. (2017). Peculiarities of software defects, VI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students. *Current Problems of Modern Technologies*. Ternopil, Ukraine.
2. Junting Gao., Liping Zhang., Fengrong Zhao., Ye Zhai. (2019). Research on Software Defect Classification, IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu, China.
3. Felix, E. A., & Lee, S. P. (2020). Predicting the number of defects in a new software version. *PLoS ONE*, 15(3). Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229131>.
4. Hovorushchenko T. (2021). Criteria and Rules for Classification of Software Failures and Vulnerabilities, The 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems. Ternopil, Ukraine
5. Akif, H. M., Reddy, R. V., Nagella, K., & Vidya, S. (2021). Software Defect Estimation Using Machine Learning Algorithms. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 10(1), 204.
6. Gopi Krishnan Rajbahadur, Shaowei Wang, Gustavo Ansalde Oliva, Ahmed E. Hassan The Impact of Feature Importance Methods on the Interpretation of Defect Classifiers *IEEE Transactions on Software Engineering* PP(99), 7, January 2021 URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSE.2021.3056941> (date of access: 06.12.2024)
7. Wang H., Yuan L., (2022). Software engineering defect detection and classification system based on artificial intelligence. *Nonlinear Engineering*, 11 (1), 380-386.
8. Yuxiang Gao, Yi Zhu, Yu Zhao (2022). Dealing with imbalanced data for interpretable defect prediction. *Information and Software Technology*, 151(2). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950584922001410789-823>.
9. Khil, O. S., & Yakovyna, V. S. (2023). Analysis of the problem of applying machine learning methods for evaluating and predicting software defects. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(3), P. 110-116. URL: <https://doi.org/10.36930/40330316>
10. Charalampos M., Karanikola A., Сотиріс К. (2024). Data-Efficient Software Defect Prediction: A Comparative Analysis of Active Learning-enhanced Models and Voting Ensembles. *Information Sciences*, 676. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002002552400700X?via%3Dihub>.
11. Tushar Agrawal, Gursimran Singh Walia., Vaibhav K. Anu. (2024). Development of a Software Design Error Taxonomy: A Systematic Literature Review. *SN Computer Science*, 5. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-024-02797-2>.
12. Li, Z., Niu, J. & Jing, XY. (2024). Software defect prediction: future directions and challenges. *Autom Softw Eng* 31, 19 URL: <https://doi.org/10.1007/s10515-024-00424-1>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-09>

УДК 37:004.7

Козак Олександр Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0919-0344>

Михайлова Людмила Миколаївна, к.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0002-3419-5446>

Семенишина Ірина Віталіївна, к.ф.-м.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ІНСТРУМЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ: ОГЛЯД І ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД

Козак О.В., Михайлова Л.М., Семенишина І.В. Інструменти моделювання та симуляції для вивчення комп'ютерних мереж: огляд і практичний досвід. Симуляція та моделювання можуть відігравати важливу роль у процесі вивчення комп'ютерних мереж. Саме ці інструменти допомагають студентам вивчити поведінку мережі та порівняти показники її продуктивності під час різних сценаріїв роботи, не вимагаючи при цьому спеціального обладнання. Однак процес інтеграції інструментів моделювання та симуляції в мережеві курси зазвичай залежить від теми курсу підготовки або особистих вподобань викладача, що може не задовольняти вимоги підготовки майбутнього фахівця. Поєднати теорію та практику в одному курсі вивчення комп'ютерних мереж надзвичайно важко, через постійне зростання складності і масштабу сучасних мереж. Це стало однією з головних даного дослідження, в ході якого було розглянуто функціонал найпопулярніших симуляторів мережі, а також згадано переваги та недоліки кожного з розглянутих інструментів, що допомогло провести аналіз можливості використання кожного з них в процесі вивчення мереж. Надано власні рекомендації для ефективного впровадження цих інструментів в процес навчання. Ці рекомендації можуть бути задіяні як на рівні шкіл та ліцеїв, так і в закладах вищої освіти, що робить їх універсальними у використанні. Питання зміни підходів у вітчизняній освіті до процесу вивчення комп'ютерних мереж визначено актуальним для наступних досліджень, оскільки через технологічну революцію та стрімкий розвиток інформаційних технологій, який триває декілька останніх десятиліть, навчальний матеріал кожного року втрачає свою актуальність, а мережі, навпаки, стають все складнішими.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, топологія мереж, навчальні курси, моделювання, симуляція, програмні засоби, критерії оцінки.

Kozak O., Mykhailova L., Semenyshyna I. Modeling and Simulation Tools for Studying Computer Networks: Overview and Practical Experience. Simulation and modelling can play an essential role in studying computer networks. These tools help students study the behaviour of the network and compare its performance indicators during different scenarios of operation without requiring special equipment. However, the process of integrating modelling and simulation tools into network courses usually depends on the topic of the training course or the personal preferences of the teacher, which may not meet the requirements of the training of a future specialist. Combining theory and practice in one course of studying computer networks is extremely difficult due to the constant increase in the complexity and scale of modern networks. This was one of the main reasons for writing the current scientific work, during which the functionality of the most popular network simulators was considered, and the advantages and disadvantages of each of the considered tools were also mentioned, which helped to analyse the possibility of using each of them in the process of studying networks. Our recommendations for effectively implementing these tools in the learning process are provided. These recommendations can be used both at the level of schools and lyceums and in higher education institutions (HEIs), making them universal. The issue of changing approaches in domestic education to the process of studying computer networks is determined to be relevant for future research since, due to the technological revolution and the rapid development of information technologies, which has been going on for the past several decades, educational material loses its relevance every year, and networks, on the contrary, are becoming more and more complex.

Keywords: computer networks, network topology, training courses, modelling, simulation, software tools, evaluation criteria.

Постановка проблеми. Комп'ютерні мережі стали невід'ємною складовою сучасного суспільства і відіграють вирішальну роль у функціонуванні компаній, урядів та окремих людей. Компанії використовують мережі, щоб забезпечити безперервну роботу пристроїв своїх співробітників. Вони можуть допомагати ділитися файлами й іншою інформацією. Мережеве обладнання забезпечує створення, керування та підтримку цих ліній зв'язку, залишаючи їх безпечними і доступними для тих, хто їх використовує [1].

Стає зрозуміло, що мірою розвитку технологій комп'ютерні мережі розвиватимуться та відіграватимуть усе більшу роль у повсякденному житті [2]. Це обумовлює важливість вивчення комп'ютерних мереж, що може відбуватися як на основі закладів освіти, так і самостійно, базуючись на онлайн-курсах. Студенти й учні, після закінчення навчальної програми, отримують знання, які дозволяють їм працювати на посаді фахівця з комп'ютерних мереж (комп'ютерного інженера).

Фахівець з комп'ютерних мереж керує всією мережею організації, де він працює. До його обов'язків, як правило, входить встановлення комунікаційного обладнання, усунення несправностей і допомога в розробці ефективних протоколів безпеки. Він також гарантує, що комп'ютери співробітників залишаються підключеними, а вебсайти компанії та онлайн-магазин активні в будь-який час [3].

Головними проблемами при підготовці комп'ютерних інженерів є неефективні витрати часу та ресурсів, які відбуваються через неправильне використання сучасних інструментів моделювання і симуляції. Ключовим способом розв'язання цих проблем є аналіз можливості використання кожного інструменту в процесі вивчення мереж. Він потребує огляду функціоналу найпопулярніших симуляторів мережі та визначення їх переваг і недоліків, що буде зроблено в даному дослідженні.

Формулювання мети і завдань дослідження. Метою статті є огляд інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж у контексті їх подальшого вивчення.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі завдання:

1. Пояснена особливість процесу моделювання та симуляції комп'ютерних мереж і визначено його переваги.
2. Виявлено найпопулярніші симулятори комп'ютерної мережі й описано їх важливі показники.
3. Здійснено аналіз можливості використання кожного з розглянутих інструментів у процесі вивчення мереж.
4. На основі всіх минулих кроків розроблено власні рекомендації для ефективного впровадження інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж у процес навчання.

Серед методів, які були використані з метою вирішення всіх визначених завдань дослідження були такі, як:

- *метод моніторингу*: використовувався для збору, систематизації та аналізу інформації про моделювання і симуляцію комп'ютерних мереж;
- *метод порівняння*: знадобився під час дослідження симуляторів і порівняння їх найважливіших характеристик;
- *метод абстрагування*: був використаний під час дослідження для виокремлення основних понять і категорій;
- *методи аналізу та синтезу*: використані в процесі виявлення найвпливовіших елементів і чинників розвитку об'єкта дослідження.

Спеціальні групи методів збору й обробки інформації, проведення аналітичної роботи та обґрунтувань було використано з метою розв'язання загальних завдань дослідження.

Актуальність вибору теми дослідження визначена важливістю питання контролю якості вивчення комп'ютерних мереж. Саме залучення в процес навчання майбутніх комп'ютерних інженерів ефективних інструментів моделювання та симуляції дозволяє їм працювати якісніше, а компаніям – забезпечити безперебійну роботу пристроїв своїх співробітників, підтримуючи безпечність і доступність їх з'єднання між собою в умовах постійного навантаження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для початку необхідно представити методологія відбору публікацій для аналізу. Головним критерієм при виборі наукової літератури була її актуальність (не старше п'яти років, крім праці В. Точиліна) та різноманітність (роботи українських та іноземних дослідників). Після формування методології відбору наукової літератури вирішено було перейти до її аналізу. В його ході буде показано вклад праць, що аналізуються, при написанні поточної статті.

Хоч комп'ютерні мережі використовуються вже не одне десятиліття, але навіть зараз тема використання інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж цікавить багатьох вітчизняних і закордонних дослідників, які працюють у галузі інформаційних технологій.

В науковій праці О. Дячук та ін. розглянуто питання вибору інструментів для моделювання й симуляції комп'ютерних мереж. Визначено, що кожен з них є унікальним, оскільки пропонує корисні можливості для досягнення різних цілей [4]. Ця наукова праця стала фундаментальною для вибору конкретних симуляторів з метою аналізу.

У статті В. Охрімчука та І. Охрімчук проведено аналіз найбільш поширених симуляторів та симулятори комп'ютерних мереж, здійснена порівняльна оцінка їх функціональних можливостей і

визначені сфери їх потенційного застосування. [5]. Це дозволило актуалізувати важливість питання кібербезпеки в процесі створення комп'ютерної мережі.

Г. Дресева запропонувала метод моделювання мережевого трафіку з фрактальними характеристиками для тестування алгоритмів і протоколів комп'ютерних мереж. В основі такого підходу знаходиться використання фрактального аналізу та марківських процесів, що дозволяє створювати числові послідовності, максимально наближені до реального трафіку телекомунікаційних мереж [6].

Дослідження методів визначення ключових характеристик комп'ютерних мереж, зокрема їх структурної живучості та надійності, стало об'єктом наукової розвідки А. Невзорова та ін. Науковці запропонували методіку розрахунку показників надійності зв'язку, провівши аналіз можливості реконструкції мереж для забезпечення їх стабільного функціонування, та надали рекомендації щодо підвищення цих характеристик [7].

У статті К. С. Хандерао та Л. С. Хедекар виявлено, що симуляція переважає аналітичні підходи в процесі вивчення комп'ютерних мереж. Ця стаття дозволила виявити конкретні переваги симуляції засобами NS-3 над іншими методами вивчення комп'ютерних мереж [8].

Дж. Гомес та ін. дослідили і порівняли існуюче програмне забезпечення для моделювання мереж. Це допомогло провести відбір параметрів для порівняння інструментів моделювання комп'ютерних мереж [9].

Оглядова стаття Г. Х. Аддай та ін. містить аналіз 33 різних симуляторів, які використовуються для тестування й оцінки нових протоколів і підходів у бездротових сенсорних мережах (WSN). Автори оцінили переваги та недоліки кожного з симуляторів у контексті різних академічних сфер WSN, надаючи детальне порівняння інструментів аналізу продуктивності за відомими метриками [10].

Проаналізувавши актуальні наукові праці, монографії і статті на профільних сайтах, можна зробити висновок, що обрана тема є актуальною та цікавою для багатьох дослідників. Також, згадуючи вагомий внесок всіх перелічених вище дослідників в акт розкриття особливостей обраної теми, потрібно також відзначити низку недоліків у їх працях, головним з яких є відсутність власного погляду на практичне впровадження інструментів моделювання та симуляції у процес навчання.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Спочатку необхідно пояснити особливості процесу моделювання та симуляції комп'ютерних мереж і визначити його переваги. Симулятор мережі – це програмне або апаратне забезпечення, яке передбачає поведінку комп'ютерної мережі, без побудови реальної мережі, імітуючи її роботу. Симуляція комп'ютерної мережі відбувається шляхом використання пристроїв і трафіку, з наступним аналізом їх ефективності. Як правило, користувачі можуть налаштувати симулятор відповідно до своїх власних аналітичних потреб. Симулятори зазвичай підтримують добре відомі протоколи, які використовуються сьогодні, такі як бездротова локальна мережа (WLAN), WiMAX, UDP та TCP (протокол керування передачею).

Деякі симулятори мережі вимагають попереднього введення сценаріїв і команд (параметрів мережі). Параметри мережі визначають стан мережі (розташування вузлів, зв'язки, передачу даних тощо). Найважливіші вихідні симуляторів містяться у файлі відстеження. Файли відстеження можуть документувати будь-які події моделювання. Деякі симулятори мають додаткові функції для збору даних безпосередньо з навколишнього середовища в різний час доби, тижня та місяця, щоб показати середній, найгірший і найкращий режими.

Мережеві симулятори також надають інструменти для полегшення візуального аналізу тенденцій і потенційних проблемних місць. Симуляція мережі складна, наприклад, коли є велика перевантаженість, середня оцінка зайнятості через високу дисперсію є важкою. Щоб оцінити переповнення мережевого буфера, час, який необхідний для відповіді, можна збільшити. Спеціальні методи, такі як контроль змін і важлива вибірка збільшують швидкість моделювання роботи мережі. Переваги використання процесу моделювання роботи мережі наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Переваги моделювання роботи комп'ютерної мережі

№	Назва переваги	Опис переваги
1	Підвищення економічної ефективності	Інструменти моделювання мережі пропонують економічно ефективне рішення для тестування мережевих конфігурацій без потреби у фізичному обладнанні. Це призводить до значної економії для

		організацій, особливо на етапах планування та розробки топології мережі
2	Зниження ризиків	Імітуючи мережеві сценарії, організації можуть виявити й усунути потенційні проблеми перед упровадженням. Цей проактивний підхід знижує ризик збоїв у мережі та підвищує загальну надійність системи
3	Попередній прогноз ефективності	Моделювання мережі дає можливість проводити поглиблене тестування продуктивності, дозволяючи організаціям оцінити, як мережа поводитиметься за різних умов. Це має вирішальне значення для оптимізації продуктивності мережі та забезпечення бездоганної взаємодії з користувачем

Джерело: узагальнено авторами на основі [11].

Крім того, моделювання комп'ютерної мережі допомагає оцінити стійкість реально існуючої мережі з аналогічними параметрами до кіберзагроз, підвищивши ефективність контрзаходів. Це мінімізує ризик втрати важливих активів та забезпечує збереження конфіденційності даних. Головною перевагою процесу моделювання в контексті безпеки є те, що можна піддавати змодельовану мережу кібератакам без ризику пошкодження мережевого обладнання.

На жаль процеси моделювання та симуляції роботи комп'ютерних мереж мають і свої обмеження, серед яких основними були визначені:

- неточності внаслідок спрощення й абстракції роботи фізично існуючих мереж;
- малий масштаб симуляції, через великі потреби в обчислювальних ресурсах і складність самих обчислень;
- дисбаланс між швидкістю та точністю, який часто виникає під час моделювання мережі на рівні пакетів.

Аналізуючи переваги й обмеження моделювання роботи комп'ютерних мереж можна дійти висновку, що деякі з них можуть нівелювати інші. Прикладом такого є попередньо визначене підвищення економічної ефективності, внаслідок моделювання, що може бути нівельоване потребою в обчислювальних ресурсах і складністю самих обчислень. Саме тому на рівні організацій при моделюванні мережі відбувається формування звіту, який містить оцінку цього процесу в контексті його фінансової доцільності.

Далі треба згадати специфіку застосування різних типів симуляторів. Перш за все, було виявлено, що будь-який мережевий симулятор містить широкий спектр мережевих технологій, які допомагають користувачам побудувати складні мережі з простих блоків, таких як вузли та зв'язки, це можуть бути ієрархічні мережі з різними типами вузлів (комп'ютери, концентратори, мережеві мости, маршрутизатори, комутатори). Техніки симуляції комп'ютерних мереж можна класифікувати за трьома основними категоріями:

1. Мова моделювання загального призначення (GPSS).
2. Комунікаційно-орієнтована мова моделювання.
3. Програмне забезпечення мережевого моделювання.

Мова моделювання загального призначення застосовується до будь-якої симуляції, особливо, якщо вона використовує модулі симулятора та мережеві елементи (вузли, канали, протоколи). Це дуже корисно при моделюванні мереж масового обслуговування, коли багато статистичних даних збираються автоматично [12]. Сильною стороною цієї категорії симуляторів є їх чудова адаптивність, що дозволяє користувачеві моделювати будь-яку мережу з будь-яким бажаним протоколом, а слабкою стороною є складність визначення топології мережі та її протоколів, що вимагає знання їх особливих мов програмування.

Комунікаційно орієнтована мова моделювання має велику схожість з GPSS. Але в симуляторах цієї категорії більшість елементів, необхідних для моделювання мережі, попередньо підготовлені, що зменшує час, який необхідний для самого процесу моделювання, але негативним чинником при цьому є падіння адаптивності. Прикладом симулятора цієї категорії є програма OPNET Modeler. Вона дозволила виконати аналіз мереж у контексті їх адаптивності та швидкості передачі даних. Основними параметрами аналізу були: затримка (у секундах), переданий трафік

(пакетів/секунду) та отриманий трафік (пакетів/секунду). Його результати довели, що локальна мережа працює краще, ніж бездротова локальна мережа з точки зору затримки та трафіку в офісі в ситуації, коли адаптивність і мобільність не є необхідними перевагами [13].

Категорія програмного забезпечення мережевого програмування містить повні пакети, які комунікаційно орієнтований симулятор може імітувати без необхідності кодування шляхом взаємодії користувача зі звичайним графічним інтерфейсом, на якому показані всі змодельовані елементи, що відповідають фактичним (маршрутизатори, комутатори тощо). На додаток до підвищення точності це покращує легкість і швидкість процесу моделювання, й тому підходить для користувачів, які не знайомі з технологіями програмування.

Загалом, професійні користувачі (комп'ютерні інженери), особливо ті, що мають справу зі специфічними мережами, віддають перевагу мовам моделювання, з якими важко працювати, на відміну від користувачів, які мають справу з темою моделювання більш примітивних і типових мереж. Для зручності останніх інструменти симуляції мережі повинні мати п'ять характеристик, які наведено в таблиці 2.

Таблиця. 2. Необхідні харатеристики симуляторів комп'ютерної мережі

№	Назва характеристики	Пояснення характеристики
1	Гнучкість у моделюванні	Користувач повинен мати можливість додавати нові типи загальних мережевих ресурсів, таких як вузли, посилання та протоколи, до набору емулятора
2	Легкість моделювання	Наявність графічних інтерфейсів і можливість структурованого моделювання у вигляді складних моделей на основі простих моделей, а також можливість повторного використання модулів з функцій, які прискорюють процес моделювання
3	Швидкість моделювання	Час обробки у великих симуляціях важливий для мереж із великою кількістю вузлів, що вимагає належного керування пам'яттю
4	Анімація процесів	Графічне відображення елементів мережі, які обмінюються повідомленнями один з одним, щоб вирішити помилки моделювання та зрозуміти, як це працює. У деяких програмах для моделювання симулятор запускається одночасно з графічним інтерфейсом, а в деяких інших після виконання симуляції
5	Можливість повторного запуску процесу моделювання	Метою моделювання, як правило, є дослідження впливу одного або кількох параметрів (середній розмір пакета або ємності буфера) на ефективність роботи мережі, тому повторюваність є необхідною умовою для симулятора

Джерело: власна розробка авторів.

Загалом, слід зазначити, що створення надійного та якісного симулятора мережі вимагає використання технології моделювання разом із знаннями топології мереж і протоколами.

Звичайно, поряд із зазначеними вище характеристиками, у кожного симулятора будуть деякі інші можливості, серед яких:

- присутність вбудованих модулів, що відповідають елементам мережі та протоколам;
- наявність генератора випадкових чисел і, у більш просунутих формах, здатність створювати величини з різними випадковими розподілами, оскільки більшість подій у процесі моделювання мають тип випадкових процесів;
- підтримка користувачів і функція своєчасного оновлення (особливо для нових протоколів) із повним доступом до документації;
- надання звітів про параметри продуктивності мережі (швидкість виходу, ефективність, затримку передачі тощо) у вигляді цифр і графічних кривих разом із можливістю виконання статистичних операцій за результатами інших позитивних характеристик симулятора.

Виявлені необхідні характеристики та можливості симуляторів комп'ютерної мережі дозволяють зробити висновок про їх зручність навіть для початківця в галузі інформаційних технологій. Таким чином, для початку процесу емуляції користувачу потрібно тільки вміти

побудувати топологію мереж, завантажити емулятор на свій пристрій і прочитати інструкцію для його використання.

Наступним кроком стало виявлення найпопулярніших симуляторів комп'ютерної мережі й опис їх важливих показників. Все програмне забезпечення для моделювання та симуляції мережі має свою специфіку, яка визначається його призначенням. Воно використовується як з навчальною метою, так і для професійної та аналітичної діяльності. Інструменти моделювання та симуляції комп'ютерної мережі за їх призначенням наведено на Рисунку 1.

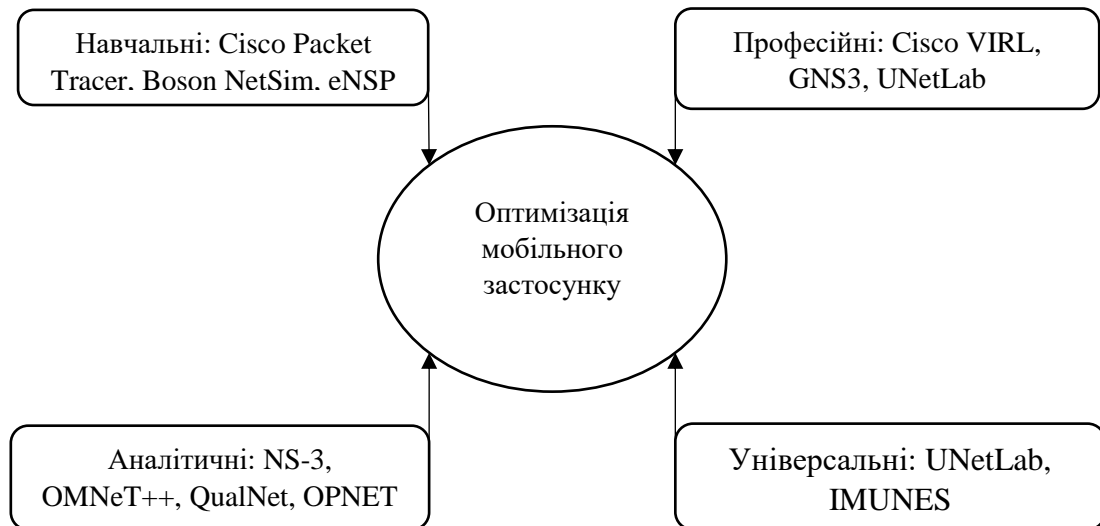


Рис. 1. Поділ інструментів моделювання та симуляції за призначенням
Джерело: власна розробка авторів.

Оскільки ця стаття присвячена огляду інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж з метою їх вивчення, то вирішено було розглянути саме симулятори Cisco Packet Tracer, Boson NetSim та eNSP.

Cisco Packet Tracer – це симулятор мережі від корпорації Cisco. Цей безкоштовний інструмент, призначений для того, щоб допомогти початківцям отримати сертифікати про знання мережевих технологій, наприклад CCNA. Програма дозволяє учням та студентам експериментувати з поведінкою мережі. Це програмне забезпечення відзначається простотою навігації і підтримує численні можливості оцінювання, візуалізації, співпраці та моделювання, щоб забезпечити безпроблемне вивчення складних ІТ-концепцій. Cisco Packet Tracer підтримує чотири групи протоколів:

- протоколи прикладного рівня (DNS, HTTP тощо);
- протоколи мережевого рівня;
- протоколи рівня передачі;
- протоколи доступу й інтерфейсу.

У нових версіях Cisco Packet Tracer постійно відбуваються покращення. Крім того, команда розробників забезпечує хорошу підтримку для користувачів. Програмне забезпечення пропонує підтримку багатьох пристроїв. Крім того, користувач може переглянути виконання всіх процесів та оцінити їх в ході симуляції [14].

Оскільки симулятор Cisco Packet Tracer добре інтегрується з академією (навчальним середовищем) Cisco, то він може працювати згідно навчального плану, щоб допомогти студентам зрозуміти тонкощі мережевого моделювання та методів візуалізації. Таким чином, це дозволяє викладачам демонструвати складні ІТ-концепції без особливих проблем.

Програмне забезпечення регулярно оновлюється, тому кожна версія має кращий рівень оптимізації і більше доступних функцій. Наприклад, в останній версії Cisco Packet Tracer було спрощено веб-інтерфейс і додано Swagger UI та стиснення Zstd. Як і будь-який інструмент Cisco Packet Tracer має свої переваги та недоліки. Серед його переваг слід підкреслити зручність для початківців, хорошу підтримку, широкі можливості моделювання мережі, можливість інтеграції із навчальним планом Cisco, підтримку кілька пристроїв та API. До його недоліків можна віднести те,

що він не ідеально підходить для експертів, має певні обмеження порівняно з фізичним обладнанням та вимагає розуміння основних мережевих концепцій [15].

Наступним було розглянуто симулятор Boson NetSim – симулятор мережі, розроблений компанією Boson Software. Він дозволяє моделювати мережеві середовища та сценарії Cisco. Цей інструмент підтримує різні команди і функції Cisco IOS, що дозволяє користувачам практикувати конфігурацію й усунення несправностей.

NetSim пропонує попередньо створені мережеві топології і сценарії, які призначені для відтворення реальних мережевих середовищ Cisco. Він дозволяє користувачам створювати і власні топології, шляхом використання інтерфейсу перетягування. NetSim підтримує різноманітні групи протоколів, серед яких:

- стек стрижневих протоколів мережі інтернет (TCP/IP);
- протоколи динамічної маршрутизації (OSPF);
- протоколи маршрутизації Cisco (EIGRP);
- протоколи очистки трафіку.

Всі переваги та недоліки використання Boson NetSim ґрунтуються на його характеристиках, які наведено в Таблиці 3.

Таблиця. 3. Характеристики симулятора Boson NetSim

№	Назва характеристики	Опис характеристики
1	Зручний інтерфейс	NetSim надає інтерфейс, який дозволяє користувачам легко налаштовувати та запускати моделювання навіть для тих, хто має обмежений досвід роботи з інструментами мережевого моделювання
2	Широкий спектр доступних мереж і протоколів	NetSim підтримує різноманітні мережі та протоколи, включаючи 5G NR, LTE, IoT, Ethernet, Wi-Fi, TCP/IP, маршрутизацію, VLAN, мобільні спеціальні мережі, автомобільні мережі, програмно визначені мережі, супутниковий зв'язок і підводні мережі
3	Великий діапазон варіантів ліцензування	NetSim пропонує гнучкі варіанти ліцензування, включаючи постійні/річні ліцензії, ліцензії на блокування вузлів/плаваючі ліцензії та параметри хмари/локальної мережі, що дозволяє користувачам вибирати та збирати компоненти відповідно до їхніх конкретних вимог
4	Можливість підключити NetSim до зовнішнього обладнання	NetSim можна підключити до реальних пристроїв, на яких запущено додатки, дозволяючи користувачам тестувати та оцінювати продуктивність своїх мережевих конфігурацій у реалістичному середовищі
5	Вихідний код C	NetSim постачається з вихідним кодом протоколу на C, що дозволяє користувачам змінювати та писати власні алгоритми. Він інтегрований із середовищем розробки MS Visual Studio для безперебійного кодування
6	Розширені утиліти	NetSim надає розширені утиліти, такі як пакетне виконання кількох симуляцій, багатопараметричне очищення та генератор сценаріїв мережі великого розміру
7	Взаємозв'язок із зовнішніми інструментами	NetSim легко інтегрується із зовнішніми інструментами, такими як MATLAB, Simulink, SUMO, Wireshark, Python, що дозволяє користувачам використовувати можливості цих інструментів для аналізу та візуалізації
8	Велика кількість прикладів	NetSim містить велику бібліотеку вбудованих прикладів і варіантів використання, що може заощадити час для користувачів, надаючи попередньо налаштовані сценарії, які служать відправною точкою для роботи симулятора

Джерело: удосконалено авторами на основі [16].

Останнім в рамках огляду став симулятор eNSP. Це китайський інструмент симуляції, який був розроблений корпорацією Huawei Technologies. У першу чергу він призначений для мережеских інженерів і архітекторів Huawei, яким необхідно перевірити проекти та конфігурації своїх мереж перед розгортанням їх у реальному світі. eNSP дозволяє створювати складні мережескі топології за допомогою графічного інтерфейсу. Цей симулятор має низку таких ключових особливостей:

- доступна підтримка пристроїв Huawei та образів NOS;
- простий у використанні графічний інтерфейс;
- наявність підтримки віртуальних мережеских функцій (VNF);
- легкість інтеграції з системою керування мережею Huawei eSpace.

До переваг симулятора eNSP відносяться: підтримка пристроїв і конфігурації Huawei з високою точністю і деталізацією; зручний інтерфейс для легкого доступу та керування; підтримка розширених функцій, таких як MPLS, BGP і VPLS; вбудовані інструменти для тестування мережі й усунення несправностей; відсутність плати за використання. Однак для нього притаманна і низка недоліків, а саме: підтримка лише пристроїв і конфігурації Huawei, що обмежує його універсальність порівняно з іншими інструментами; менший рівень деталізації і точності ніж у реальних пристроїв; менш широко використовується або підтримується порівняно з іншими інструментами; для коректної роботи може знадобитися додаткове програмне забезпечення та плагіни [17].

Після огляду найпопулярніших симуляторів мережі, що використовуються для навчання, було здійснено аналіз можливості використання кожного з розглянутих інструментів у процесі вивчення мереж. Його результати показали, що для учнів шкіл, у контексті уроків інформатики, найбільш реалістичним для використання є Cisco Packet Tracer. Цей симулятор також можна рекомендувати для самостійного вивчення мереж під час навчальних курсів. Критерієм оцінки, що дозволяє рекомендувати саме його, є простота в використанні. Для вивчення мереж в умовах закладу вищої освіти (ЗВО) можна обрати як Boson NetSim так і eNSP, але, зважаючи на недружню позицію Китаю стосовно України та велику історію американських санкцій проти корпорації Huawei Technologies, використання симулятора eNSP у вітчизняній освіті може мати багато ризиків, найголовнішим з яких є безпека користувачів і конфіденційність їх даних.

Cisco Packet Tracer не рекомендовано використовувати в умовах ЗВО через такі його особливості:

- eNSP підтримує образи NOS різних постачальників, тоді як Cisco Packet Tracer підтримує лише образи Cisco NOS;
- eNSP дозволяє автоматизацію та програмування мережі за допомогою сценаріїв Python, а Cisco Packet Tracer – ні;
- eNSP підтримує широкий спектр пристроїв, тоді як Cisco Packet Tracer – лише пристрої Cisco.

Простота використання Cisco Packet Tracer не може компенсувати таку кількість обмежень, тому на різних етапах учні та студенти повинні працювати з різними симуляторами мережі.

Для збільшення ефективності використання симуляторів у процесі навчання викладачам потрібно ініціювати такі практики:

- вивчати документацію й інструкції до використання різноманітних симуляторів під час занять;
- проводити тестування навичок практичного використання учнями симуляторів;
- регулярно оновлювати навчальний план (допомагає покращити продуктивність програми навчання);
- створювати тестові мережі на основі найкращих моделей і симуляцій з метою заохочення учнів.

Отже, процеси моделювання та симуляції комп'ютерних мереж мають вирішальне значення для успішного створення реальних мереж. Вони допомагають під час навчання, оскільки для використання симуляторів від учнів вимагається знати особливості протоколів та топології мереж.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В умовах перманентного розвитку інформаційних технологій неможливо уявити роботу компаній без комп'ютерних мереж. У ході

дослідження було розглянуто функціонал найпопулярніших симуляторів мережі (Cisco Packet Tracer, Boson NetSim та eNSP), а також згадано переваги та недоліки кожного з розглянутих інструментів, що допомогло провести аналіз можливості використання кожного з них у процесі вивчення мереж. Його результати показали, що для учнів шкіл, у контексті уроків інформатики, найбільш реалістичним для використання є Cisco Packet Tracer, а для студентів ЗВО – Boson NetSim та eNSP.

Також було надано власні рекомендації для ефективного впровадження цих інструментів у процес навчання. Ці рекомендації можуть бути задіяні як на рівні шкіл та ліцеїв, так і в закладах вищої освіти, що робить їх універсальними у використанні. Питання зміни підходів у вітчизняній освіті до процесу вивчення комп'ютерних мереж визначено актуальним для наступних досліджень, оскільки через технологічну революцію та стрімкий розвиток інформаційних технологій, який триває декілька останніх десятиліть, навчальний матеріал кожного року втрачає свою актуальність, а мережі, навпаки, стають дедалі складнішими.

Список бібліографічного опису:

1. Section Technologies. The Importance of Computer Networking in your Business. *LinkedIn*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/importance-computer-networking-your-business-section-technologies> (дата звернення: 07.12.2024).
2. Importance of Computer Networking. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-computer-networking/> (дата звернення: 07.12.2024).
3. What Is a Network Specialist and How to Become One. ZipRecruiter Marketplace Research Team. URL: <https://www.ziprecruiter.com/career/Network-Specialist/What-Is-How-to-Become#:~:text=Job%20Description%20Sample-What%20Is%20a%20Network%20Specialist?.develop%20more%20effective%20security%20protocol>. (дата звернення: 07.12.2024).
4. Дячук О. Ю., Колошук М. С., Окунькова О. О., Воротніков В. В. Комплексний аналіз програмного забезпечення для моделювання та емуляції комп'ютерних мереж: інструменти, застосування та майбутні напрями. *Технічна інженерія*. 2024. № 1 (93). С. 153–169. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-153-169](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-153-169) (дата звернення: 07.12.2024).
5. Охрімчук В. В., Охрімчук І. А. Аналіз засобів моделювання мереж щодо можливості їх використання для практичної підготовки фахівців із кібербезпеки. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2024. Т. 1. № 27 (I). С. 56–68. URL: <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.05> (дата звернення: 07.12.2024).
6. Дреєва Г. М. Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2022. Т. 4. № 70. С. 75–78. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.075> (дата звернення: 07.12.2024).
7. Моделі оцінки структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж / А. Невзоров та ін. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 3. С. 164–169. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-19> (дата звернення: 07.12.2024).
8. Khandergao K. S., Khedekar L. S. Study and systematic review of computer network simulation with NS-3. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development (IJIIRD)*. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 28–33. URL: <https://ijird.com/wp-content/uploads/060106.pdf> (дата звернення: 07.12.2024).
9. A survey on network simulators, emulators, and testbeds used for research and education / J. Gomez et al. *Computer Networks*. 2023. Vol. 237. Article 110054. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110054> (дата звернення: 07.12.2024).
10. Investigating and analyzing simulation tools of wireless sensor networks: A comprehensive survey / G. H. Adday et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 22938–22977. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3362889> (дата звернення: 07.12.2024).
11. Top 10 most popular network simulation tools. *I-MEDITA*. URL: <https://www.imedita.com/blog/top-10-list-of-network-simulation-tools/> (дата звернення: 07.12.2024).
12. Davronbekov D., Aripov J. Simulation modeling of the data network diagnosis system using GPSS. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 16–20. URL: <https://acta.polito.uz/index.php/journal/article/view/218> (дата звернення: 07.12.2024).
13. Noman H. M., Hussein M. A., Abdulrazzaq A. A. WiMax network design and simulation for middle technical university campus using OPNET modeler. *Iraqi Journal of Science*. 2023. Vol. 64, No. 12. P. 6586–6595. URL: <https://doi.org/10.24996/ij.s.2023.64.12.38> (дата звернення: 07.12.2024).
14. Krasnoshapka D. V., Siryk S. F. Heterogeneous computer networks simulation in Cisco Packet Tracer environment. *Scientific Collection «InterConf»*. 2022. No. 132. P. 466–469. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1685/1715> (дата звернення: 08.12.2024).
15. Buggs C. Cisco Packet Tracer. *Softonic*. URL: <https://packet-tracer.en.softonic.com/> (дата звернення: 08.12.2024).
16. What is NetSim? *TrustRadius*. URL: <https://www.trustradius.com/products/netsim/reviews#overview> (дата звернення: 08.12.2024).
17. GNS3 vs EVE-NG vs Packet Tracer vs VIRL vs eNSP: Which network emulator or simulator is right for you? *Infosyte*. URL: <https://infosyte.com/network-simulators/> (дата звернення: 10.12.2024).

References:

1. Section Technologies. (2023, September 20). *The importance of computer networking in your business*. LinkedIn. Retrieved from <https://www.linkedin.com/pulse/importance-computer-networking-your-business-section-technologies>
2. GeeksforGeeks. (2020, September 17). *Importance of computer networking*. Retrieved from <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-computer-networking/>
3. ZipRecruiter Marketplace Research Team. (n. d.). *What is a network specialist and how to become one*. Retrieved from <https://www.ziprecruiter.com/career/Network-Specialist/What-Is-How-to-Become#:~:text=Job%20Description%20Sample-.What%20Is%20a%20Network%20Specialist?.develop%20more%20effective%20security%20protocol.>
4. Dyachuk, O. Y., Koloshchuk, M. S., Okunkova, O. O., & Vorotnikov, V. V. (2024). Comprehensive analysis of software for modeling and emulating computer networks: tools, applications and future directions. *Tekhnichna inzheneriya*, 1(93), 153–169. Retrieved from [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-153-169](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-153-169) [in Ukrainian].
5. Okhrimchuk, V., & Okhrimchuk, I. (2025). Analysis of network modelling tools for the possibility of their use for practical training of cybersecurity specialists. *Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems*, 1(27(I)), 56–68. Retrieved from <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.05> [in Ukrainian].
6. Drieieva, H. (2022). A method of simulation of computer network traffic with fractal properties. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 4(70), 75–78. Retrieved from <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.075> [in Ukrainian].
7. Nevzorov, A. Skliarenko, O. Kolodinska, Ya. & Nikolaievskiy, O. (2023). Assessment models of structural survival and reliability of computer networks. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 164–169. Retrieved from <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-19> [in Ukrainian].
8. Khanderao, K. S., & Khedekar, L. S. (2021). Study and systematic review of computer network simulation with NS-3. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development (IJIRD)*, 6(1), 28–33. URL: Retrieved from <https://ijird.com/wp-content/uploads/060106.pdf>
9. Gomez, J., Kfoury, E. F., Crichigno, J., & Srivastava, G. (2023). A survey on network simulators, emulators, and testbeds used for research and education. *Computer Networks*, 237, Article 110054. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110054>
10. Adday, G. H., Subramaniam, S. K., Zukarnain, Z. A., & Samian, N. (2024). Investigating and analyzing simulation tools of wireless sensor networks: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 12, 22938–22977. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3362889>
11. I-MEDITA. (n. d.). *Top 10 Most Popular Network Simulation Tools*. Retrieved from <https://www.imedita.com/blog/top-10-list-of-network-simulation-tools/>
12. Davronbekov, D., & Aripov, J. (2023). Simulation modeling of the data network diagnosis system using GPSS. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*, 13(2), 16-20. Retrieved from <https://acta.polito.uz/index.php/journal/article/view/218> [in English].
13. Noman, H. M., Hussein, M. A., & Abdulrazzaq, A. A. (2023). WiMax network design and simulation for middle technical university campus using OPNET modeler. *Iraqi Journal of Science*, 64(12), 6586–6595. Retrieved from <https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.12.38>
14. Siryk, S. (2022). Heterogeneous computer networks simulation in Cisco Packet Tracer environment. *Scientific Collection «InterConf»*, 132, 466-469. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1685/1715>
15. Buggs, C. (n. d.). *Cisco Packet Tracer*. Softonic. Retrieved from <https://packet-tracer.en.softonic.com/>
16. NetSim. (n. d.). *What is NetSim?* Retrieved from <https://www.trustradius.com/products/netsim/reviews#overview>
17. Infosyte. (2023, March 13). *GNS3 vs EVE-NG vs Packet Tracer vs VIRL vs eNSP: Which Network Emulator or Simulator is Right for You?* Retrieved from <https://infosyte.com/network-simulators/>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-10>

УДК 004.5

Міронов Нікіта Олександрович, здобувач вищої освіти

Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2516-045X>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ВЗАЄМОДІЇ З КОМП'ЮТЕРОМ ЗА ДОПОМОГОЮ ЖЕСТИВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ COMPUTER VISION

Міронов Н.О., Самчук Л.М. Розробка застосунку для взаємодії з комп'ютером за допомогою жестів з використанням технологій Computer Vision. У роботі досліджено методи безконтактного керування комп'ютером за допомогою жестів рук на основі технологій комп'ютерного зору та машинного навчання. Наведено приклади застосування технологій в різних сферах життя, де вони показують переважну ефективність та зручність над традиційними інтерфейсами взаємодії з системою. Описано засоби та інструменти, використані під час розробки програмного застосунку. Запропоновано модульну архітектуру системи, яка забезпечує розпізнавання жестів у реальному часі, включаючи сегментацію зображень, відстеження ключових точок руки та класифікацію рухів. Реалізовано функціонал для переміщення курсора, виконання лівих та правих кліків, подвійних клацань, прокручування сторінок і регулювання гучності. Результатом роботи є програмний продукт, який підтримує переміщення курсора миші, лівий і правий кліки, подвійний клік, перетягування об'єктів, скролінг та регулювання гучності. Проведено тестування як функціонування основних команд застосунку, так і роботи на різних апаратних конфігураціях в реальному часі. Запропоновано рішення для вдосконалення надалі й розширення функціоналу програмного забезпечення.

Ключові слова: розпізнавання жестів, безконтактна взаємодія, комп'ютерний зір, машинне навчання, Python, MediaPipe, OpenCV, безконтактна взаємодія, обробка зображень, відеопотік, управління і виконання функціймиші, крос-платформність, адаптивні алгоритми.

Mironov N., Samchuk L. Development of an application for interaction with a computer using gestures using Computer Vision technologies. The work investigates methods for contactless computer control using hand gestures based on computer vision and machine learning technologies. Examples of the application of technologies in various areas of life are given, where they show superior efficiency and convenience over traditional interfaces for interacting with the system. The tools and instruments used in the development of the software application are described. A modular architecture of the system is proposed that provides real-time gesture recognition, including image segmentation, tracking of key hand points and classification of movements. Functionality for moving the cursor, performing left and right clicks, double clicks, scrolling pages and adjusting the volume is implemented. The result of the work is a software product that supports moving the mouse cursor, left and right clicks, double clicks, dragging objects, scrolling and adjusting the volume. Both the functioning of the main application commands and the operation on different hardware configurations in real time were tested. Solutions for further improvement and expansion of the software functionality were proposed.

Keywords: gesture recognition, contactless interaction, computer vision, machine learning, Python, MediaPipe, OpenCV, contactless interaction, image processing, video stream, mouse control and execution, cross-platform, adaptive algorithms.

Постановка наукової проблеми. Сучасні технології взаємодії з комп'ютером, такі як клавіатури та миші, залишаються основним інструментом введення даних. Однак можна визначити ситуації, коли вони можуть бути не зовсім доречні. Наприклад, фізичний контакт з пристроями може бути небажаним в умовах підвищених вимог до гігієни або під час пандемій, а для людей з обмеженими руховими можливостями такі девайси часто є недоступними або незручними. Крім того, у спеціалізованих установах медицини, промисловості, або в сфері віртуальної реальності, зростає потреба в інтуїтивній безконтактній взаємодії, яка імітує природні рухи людини.

Актуальність розробки системи жестового керування комп'ютером полягає в необхідності створення універсальної та ефективної системи, здатної замінити традиційні пристрої введення. Така система має забезпечувати високу точність розпізнавання жестів навіть у несприятливих зовнішніх умовах, таких як змінне освітлення. Крім того, важливим є мінімізація затримки для забезпечення роботи в реальному часі, що дозволить досягти природної плавності керування.

Вирішення цієї проблеми відкриває нові можливості для застосування технологій в медицині (керування обладнанням без фізичного контакту), освіті (інтерактивні презентації), військовій промисловості (віддалене виконання безпечних операцій) та для користувачів з обмеженими можливостями. Таким чином, розробка стабільної та доступної системи керування жестами є критично важливою для прогресу в галузі людино-машинної взаємодії надалі.

Аналіз досліджень. Сучасні системи безконтактного керування спираються на технології комп'ютерного зору, які дають змогу розпізнавати та інтерпретувати рухи без затримок. Серед ключових інструментів використовується бібліотека OpenCV, що надає функціонал для маніпуляцій із зображеннями та аналізу відеоданих. Зокрема, за її допомогою реалізуються алгоритми

відстеження положення рук і пальців, що дозволяє імітувати дії миші, такі як пересування курсору або виконання натискань.

Окремим підходом є використання маркерних систем, де на пальцях розміщуються кольорові маркери. Ця методика, заснована на OpenCV, покращує стабільність керування завдяки точній ідентифікації кольорових точок [1]. Алгоритми обробки зображень аналізують зміни у відтінках та просторовому розташуванні маркерів, що дає змогу розрізняти конкретні команди (наприклад, лівий або правий клік). Таке рішення усуває неоднозначність у розпізнаванні жестів, особливо в умовах швидких рухів або проблемного освітлення.

Ще одним перспективним підходом є система, запропонована у роботі [2], яка використовує згорткові нейронні мережі (CNN) для високоточного розпізнавання жестів у реальному часі. Дослідження демонструє ефективність поєднання мови Python та глибокого навчання для створення безконтактного інтерфейсу, здатного до роботи в різних складних умовах. Методика передбачає попередню обробку зображень, сегментацію області руки та вилучення ключових ознак для подальшої класифікації жестів. Особливістю цього підходу є розширення навчальної вибірки за допомогою методів аугментації, що дозволило підвищити точність розпізнавання з 96,9% до 99,2%. Запропоноване рішення було протестоване в сценаріях управління роботизованим маніпулятором, що підтвердило його придатність для промислового використання.

У дослідженні [3] запропоновано підхід до розпізнавання жестів для безконтактної взаємодії з комп'ютером у реальному часі, де автори використовують комбінацію бібліотек OpenCV та MediaPipe. Розроблена методологія передбачає сегментацію зображень, виявлення контурів рук і точне визначення положення пальців, що забезпечує розпізнавання жестів. Функціонал системи включає управління курсором, виконання натискань, прокручування, перетягування об'єктів та регулювання гучності. Особливістю запропонованого рішення є його ефективність у реальному часі за умови мінімальних обчислювальних ресурсів, що робить систему придатною для широкого спектра застосувань.

Наукові праці неодноразово акцентують переваги технологій розпізнавання жестів, зокрема у сценаріях, де зменшення фізичного контакту з поверхнями є критичним – наприклад, у замкнутих просторах або під час спалахів інфекційних захворювань. Ілюстрацією цього слугує система [4], розроблена на етапі активного поширення COVID-19, яка дозволяє керувати комп'ютером через жести без необхідності дотику до пристроїв, тим самим мінімізуючи ризик передачі патогенів. Подібні ініціативи підкреслюють не лише теоретичний потенціал таких рішень, але й їхню практичну цінність у сучасних умовах.

У контексті військових операцій, зокрема при виконанні інженерно-саперних завдань, технології розпізнавання жестів відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки персоналу. Використання дистанційно керованих роботів з функціональними маніпуляторами [5] дозволяє виконувати операції з обмеженим безпосереднім втручанням людини, що знижує прямий ризик для життя. Яскравим прикладом є система DataGlove, яка фіксує та передає координати рук оператора в режимі реального часу, забезпечуючи управління робототехнічними комплексами. Такі інновації значно зменшують імовірність помилок під час знешкодження вибухових пристроїв, де кожен міліметр контролю має фатальне значення.

Мета роботи. Метою дослідження є розробка ефективної системи безконтактного керування комп'ютером за допомогою жестів. Основним завданням є створення програмного рішення на базі технологій комп'ютерного зору (OpenCV) та відстеження рухів (MediaPipe), здатного замінити пристрої введення, такі як миша або клавіатура. Система має забезпечувати реалізацію базових функцій миші та роботу в реальному часі. Окрім технічних аспектів, робота спрямована на аналіз точності та стабільності системи через тестування з участю користувачів у різних сценаріях.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Сучасні системи розпізнавання жестів, попри високий рівень точності, стикаються з суттєвими обмеженнями, зокрема обмеженою кількістю підтримуваних жестів та труднощами адаптації до нових сценаріїв використання. Наприклад, багато рішень не здатні динамічно впроваджувати нові жести без повної переробки алгоритмів, що обмежує їх застосування в складних умовах. Для подолання недоліків у даній роботі пропонується система, яка інтегрує технології комп'ютерного зору (CV) для створення інтуїтивного безконтактного інтерфейсу керування.

Для реалізації системи обрано мову Python, як інтерпретовану мову програмування, що є ключовим інструментом у сфері машинного навчання та комп'ютерного зору завдяки своїй гнучкості та великій кількості бібліотек [6]. Синтаксис мови, зрозумілий навіть новачкам, і

можливість швидкого прототипування роблять його ідеальним для розробки системи розпізнавання жестів.

Python розширює набір доступних інструментів, та крос-платформну сумісність, що дозволяє запускати код на різних ОС без змін. Проте мова має обмеження: порівняно з C++, швидкість виконання нижча, а залежність від зовнішніх бібліотек іноді ускладнює сумісність версій. Незважаючи на це, Python залишається оптимальним вибором для швидкої ітерації та тестування ідей, особливо на ранніх етапах проекту. Використання бібліотек MediaPipe та OpenCV дає змогу створювати системи, які аналізують рухи рук у реальному часі, перетворюючи їх у команди для керування комп'ютером.

MediaPipe, розроблена Google, є основним інструментом для розпізнавання жестів у даній системі. Вона використовує попередньо навчені моделі машинного навчання, щоб ідентифікувати 21 ключову точку на руці [7], включаючи суглоби пальців та основу зап'ястя. Процес починається з сегментації зображення, де алгоритми виділяють область, що містить руку, ізолюючи її від фону за допомогою обмежувальних рамок. Далі, за допомогою глибоких нейронних мереж, система прогнозує точні координати кожної точки, враховуючи дані з попередніх кадрів для забезпечення плавності відстеження. Наприклад, коли користувач згинає вказівний палець, модель MediaPipe визначає зміну кута між фалангами та передає ці дані для подальшої обробки.

OpenCV відповідає за обробку відеопотоку. Бібліотека застосовує такі методи, як фільтрація шумів, корекція кольорового балансу та перетворення зображень у простір HSV, щоб підготувати дані для точного аналізу. Важливу роль відіграє метод Лукаса-Канаде, який визначає оптичний потік [8] – вектор зміщення ключових точок між послідовними кадрами. Це дозволяє системі відстежувати не лише статичні позиції руки, але й її динамічні рухи.

Для перетворення розпізнаних жестів у конкретні дії використовується бібліотека ruyprut. Вона взаємодіє з системним API [9]. Керування гучністю реалізоване через бібліотеку rucaw, яка використовує Windows CoreAudio API [10], що дозволяє програмно змінювати рівень звуку без затримок.

Розробка програмного забезпечення для безконтактної взаємодії з комп'ютером розпочалася з вибору інструментів. Як середовище розробки обрано VisualStudioCode, що забезпечило зручність написання, тестування та налагодження коду. Базою став інтерпретатор Python 3.8.5, який був інстальований і налаштований на етапі підготовки. Додатково встановлено необхідні залежності, включаючи бібліотеки для роботи з відео, обробки зображень та емуляції дій миші.

Архітектура системи реалізована за модульним принципом, що дозволяє розділити функціонал на незалежні компоненти. Наприклад, один з компонентів відповідає за виявлення рук, ідентифікацію ключових точок та розрахунок відстаней між пальцями за допомогою алгоритмів MediaPipe, тоді як другий перетворює координати рук у команди миші, а третій дозволяє налаштувати параметри звуку і регулювання гучності системи. Таким чином, модульність системи дозволяє легко додавати нові функції та жести для масштабування керування пристроями, без змін у базовому коді.

Основним компонентом системи є файл main.py, який ініціалізує роботу всіх модулів. Для роботи з відео потоком імпортовано бібліотеку OpenCV, що забезпечує захоплення кадрів з веб-камери та їх подальшу обробку. У функції main() реалізовано безперервний цикл, який аналізує кожен кадр: виконує корекцію кольорового балансу, зміну розміру зі збереженням пропорцій та додавання елементів інтерфейсу, таких як прямокутна рамка для зони керування, шкалу гучності та індикатор частоти кадрів (FPS). Код реалізації даного циклу продемонстровано в лістингу 1.

Лістинг 1 – Реалізація кадру

```
while True:
    img, frameReduction = screen_settings.get_frame()
    if img is None:
        break
    screen_settings.enforce_aspect_ratio()
    img = detector.findHands(img)
    lmList = detector.findPosition(img, draw=False)
    if len(lmList) != 0:
        fingers = detector.fingersUp()
        cv2.rectangle(img, (frameReduction, frameReduction),
```

```
(screen_settings.wCam - frameReduction,  
screen_settings.hCam - frameReduction),  
(255, 0, 255), 2)  
img = volume_control.draw_volume_interface(img, window_height)  
img = screen_settings.draw_fps(img)
```

кінець лістингу 1

Використовуючи бібліотеку MediaPipe, створено модуль, що відповідає за розпізнавання рук. Клас HandDetector() включає три ключові методи: find Hands() для попередньої обробки зображення та виділення контурів рук, find Position() для визначення координат кінчиків пальців і find Distance() для розрахунку відстаней між точками (ліст. 2). Ця логіка є основою для перетворення фізичних рухів у цифрові команди.

Лістинг 2 – Розпізнавання рук

```
class HandDetector:  
def __init__(self, mode=False, maxHands=1, detectionCon=0.5,  
trackCon=0.5):  
    self.mode = mode  
    self.maxHands = maxHands  
    self.detectionCon = detectionCon  
    self.trackCon = trackCon  
    self.mpHands = mp.solutions.hands  
    self.hands = self.mpHands.Hands(  
        static_image_mode=self.mode,  
        max_num_hands=self.maxHands,  
        min_detection_confidence=self.detectionCon,  
        min_tracking_confidence=self.trackCon)  
    self.mpDraw = mp.solutions.drawing_utils  
    self.tipIds = [4, 8, 12, 16, 20]  
def findHands(self, img, draw=True):  
    imgRGB = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)  
    self.results = self.hands.process(imgRGB)  
    if self.results.multi_hand_landmarks:  
        for handLms in self.results.multi_hand_landmarks:  
            if draw:  
                self.mpDraw.draw_landmarks(img, handLms,  
self.mpHands.HAND_CONNECTIONS)  
            return img  
    def findPosition(self, img, draw=False):  
        self.lmList = []  
        if self.results.multi_hand_landmarks:  
            myHand = self.results.multi_hand_landmarks[0]  
            for id, lm in enumerate(myHand.landmark):  
                h, w, c = img.shape  
                cx, cy = int(lm.x * w), int(lm.y * h)  
                self.lmList.append([id, cx, cy])  
            if draw:  
                cv2.circle(img, (cx, cy), 7, (255, 0, 255),  
cv2.FILLED)  
            return self.lmList  
    def findDistance(self, p1, p2, img, draw=True, r=7, t=3):  
        x1, y1 = self.lmList[p1][1:]  
        x2, y2 = self.lmList[p2][1:]  
        cx, cy = (x1 + x2) // 2, (y1 + y2) // 2  
        if draw:  
            cv2.line(img, (x1, y1), (x2, y2), (255, 0, 255), t)
```

```
cv2.circle(img, (x1, y1), r, (255, 0, 255), cv2.FILLED)
cv2.circle(img, (x2, y2), r, (255, 0, 255), cv2.FILLED)
cv2.circle(img, (cx, cy), r, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
length = math.hypot(x2 - x1, y2 - y1)
return length, img, [x1, y1, x2, y2, cx, cy]
```

кінець лістингу 2

Інтегровано модуль, який відповідає за конфігурацію вікна програми та адаптацію відеопотоку до різних умов відображення. Клас Screen Settings() використовує Windows API для отримання метрик екрана користувача, що дозволяє автоматично розміщувати вікно програми в конкретному місці екрана при запуску. Метод get_frame() забезпечує захоплення кадрів з веб-камери та їх адаптацію до поточних розмірів вікна. Під час зміни розмірів вручну система автоматично коригує пропорції зображення, зберігаючи співвідношення сторін 4:3. Це запобігає деформації відеопотоку та забезпечує стабільність розпізнавання жестів. Для візуалізації інтерфейсу додано індикатор FPS. Код з налаштування вікна програми показано в лістингу 3.

Лістинг 3 – Налаштування вікна

```
class ScreenSettings:
    def __init__(self):
        self.wCam = 640
        self.hCam = 480
        self.user32 = ctypes.windll.user32
        self.wScr = self.user32.GetSystemMetrics(0)
        self.hScr = self.user32.GetSystemMetrics(1)
        self.pTime = 0
        self.aspect_ratio = 4.0 / 3.0
        self.cap = cv2.VideoCapture(0)
        self.cap.set(3, self.wCam)
        self.cap.set(4, self.hCam)
        self._initialize_window()
    def _initialize_window(self):
        cv2.namedWindow(self.window_name, cv2.WINDOW_NORMAL)
        cv2.resizeWindow(self.window_name, 400, 300)
    def position_window(self):
        if self.first_display:
            x_position = self.wScr - 400
            taskbar_height = GetSystemMetrics(SM_CYSCREEN) -
            GetSystemMetrics(SM_CYFULLSCREEN)
            y_position = self.hScr - 300 - taskbar_height
            cv2.moveWindow(self.window_name, x_position, y_position)
            self.first_display = False
    def get_frame(self):
        success, img = self.cap.read()
        if not success:
            return None, None
        window_rect = cv2.getWindowImageRect(self.window_name)
        window_width = window_rect[2]
        window_height = window_rect[3]
        self.wCam = window_width
        self.hCam = window_height
        frameReduction = int(window_width * 0.16)
        if window_width > 0 and window_height > 0:
            img = cv2.resize(img, (window_width, window_height))
        return img, frameReduction
    def draw_fps(self, img):
        font_scale = self.hCam / 480.0
```

```
cTime = time.time()
fps = 1 / (cTime - self.pTime)
self.pTime = cTime
return img
```

кінець лістингу 3

Для модуля емуляції дій миші використано бібліотеку `pynput`. Метод `handle_mouse_movement()` перетворює координати руки, отримані з модуля розпізнавання рук, у позицію курсору на екрані, враховуючи реальні розміри дисплея для точного позиціонування. Рух вказівного пальця активізує переміщення курсору, тоді як одночасне підняття вказівного та середнього пальців ініціює лівий клік або перетягування. Додавання безіменного пальця до комбінації викликає правий клік, а положення великого пальця визначає напрямок прокрутки – вгору або вниз (ліст. 4). Для зменшення «дрижання» курсору застосовано алгоритми згладжування руху на основі лінійної інтерполяції. Це дозволило досягти плавності навіть при швидких рухах руки.

Лістинг 4 – Емуляція дій миші

```
class MouseControl:
    def __init__(self, screen_width, screen_height):
        self.mouse = Controller()
        self.smoothing = 7
        self.click_smoother = 0
    def handle_mouse_movement(self, x1, y1, frame_reduction,
window_width,
window_height):
        x5 = np.interp(x1, (frame_reduction, window_width -
frame_reduction), (0, self.wScr))
        y5 = np.interp(y1, (frame_reduction, window_height -
frame_reduction), (0, self.hScr))
        self.cLocX = self.pLocX + (x5 - self.pLocX) / self.smoothing
        self.cLocY = self.pLocY + (y5 - self.pLocY) / self.smoothing
        self.mouse.position = (self.wScr - self.cLocX, self.cLocY)
        self.pLocX, self.pLocY = self.cLocX, self.cLocY
        if self.click_smoother >= 30:
            self.RMB_pressed = False
            self.LMB_pressed = False
        self.click_smoother += 1
        return (x1, y1)
    def handle_left_click_and_drag(self, img, length_im, line_info_im,
frame_reduction, window_width, window_height):
        self.RMB_pressed = False
        if not self.dragging and length_im < 25:
            cv2.circle(img, (line_info_im[4], line_info_im[5]),
7, (0, 255, 0), cv2.FILLED)
            self.mouse.press(Button.left)
            self.dragging = True
            self.LMB_pressed = True
        elif self.dragging:
            cv2.circle(img, (line_info_im[4], line_info_im[5]),
7, (0, 0, 255), cv2.FILLED)
    def handle_scrolling(self, thumb_up):
        if thumb_up:
            self.mouse.scroll(0, -0.5)
        else:
            self.mouse.scroll(0, 0.5)
    def handle_right_click(self, img, line_info_im, line_info_mr):
```

```
if self.dragging:
    self.mouse.release(Button.left)
    self.dragging = False
    self.LMB_pressed = False
if not self.RMB_pressed:
    cv2.circle(img, (line_info_im[4], line_info_im[5]),
               7, (0, 255, 255), cv2.FILLED)
    cv2.circle(img, (line_info_mr[4], line_info_mr[5]),
               7, (0, 255, 255), cv2.FILLED)
    self.mouse.click(Button.right, 1)
    self.RMB_pressed = True
    self.LMB_pressed = False
return img
```

кінець лістингу 4

Регулювання гучності реалізовано в окремому модулі через інтеграцію бібліотеки `rusaw`, яка взаємодіє з аудіосистемою Windows. Метод `handle_volume_gesture()` аналізує вертикальні рухи руки: підняття долоні збільшує гучність, а опускання – зменшує. Візуальна шкала гучності, створена за допомогою `OpenCV`, динамічно адаптується до розмірів вікна програми, відображаючи поточний рівень звуку у відсотках (ліст. 5).

Лістинг 5 – Регулювання гучності

```
class VolumeControl:
def __init__(self):
    devices = AudioUtilities.GetSpeakers()
    interface = devices.Activate(IAudioEndpointVolume._iid_,
    CLSCTX_ALL, None)
    self.volume = cast(interface, POINTER(IAudioEndpointVolume))
    self.volRange = self.volume.GetVolumeRange()
    self.minVol, self.maxVol = self.volRange[0], self.volRange[1]
    self.current_volume = self.volume.GetMasterVolumeLevelScalar()
    self.volume_bar = int(np.interp(self.current_volume, [0, 1],
[400,
150]))
    self.volume_percentage = int(self.current_volume * 100)
def handle_volume_gesture(self, lmList):
    fingertips = [lmList[tip] for tip in [8, 12, 16, 20]]
    avg_y = sum(tip[2] for tip in fingertips) / len(fingertips)
    vol = np.interp(avg_y, [80, 150], [self.maxVol, self.minVol])
    current_volume = np.interp(vol, [self.minVol, self.maxVol], [0,
1])
    self.volume.SetMasterVolumeLevelScalar(current_volume, None)
    self.volume_bar = np.interp(avg_y, [80, 150], [150, 400])
    self.volume_percentage = int(np.interp(avg_y, [80, 150], [100,
0]))
def draw_volume_interface(self, img, window_height):
    height, width = img.shape[:2]
    volume_x = int(width * 0.1)
    volume_top = int(height * 0.3)
    volume_bottom = int(height * 0.8)
    volume_width = int(width * 0.05)
    cv2.rectangle(img, (volume_x, volume_top),
                  (volume_x + volume_width, volume_bottom),
                  (0, 255, 0), 3)
    current_volume_height = int(np.interp(self.volume_bar, [150,
400],
```

```
        [volume_top,  
volume_bottom]))  
        cv2.rectangle(img, (volume_x, current_volume_height),  
        (volume_x + volume_width, volume_bottom),  
        (0, 255, 0), cv2.FILLED)  
return img
```

кінець лістингу 5

Після завершення розробки програмного забезпечення для керування комп'ютером жестами, ініційовано комплексне тестування, метою якого стала перевірка відповідності системи встановленим вимогам. Тестування охопило послідовну перевірку кожного жесту, щоб забезпечити коректність виконання всіх команд та мінімізувати ризик неправильної інтерпретації рухів.

У разі відсутності критичних помилок у коді, програма успішно запускалася, активуючи веб-камеру та відображаючи інтерфейсі елементи: індикатор FPS у реальному часі та шкалу гучності з числовим відображенням рівня звуку у відсотках. Перший етап тестування зосередився на перевірці відображення рамки зони керування, яка мала адаптуватися до змін розмірів вікна програми. Рамка з'являлася лише тоді, коли користувач розміщував руку в заданій області, і зникала при її видаленні, що підтвердило коректність роботи алгоритмів відстеження (рис. 1).

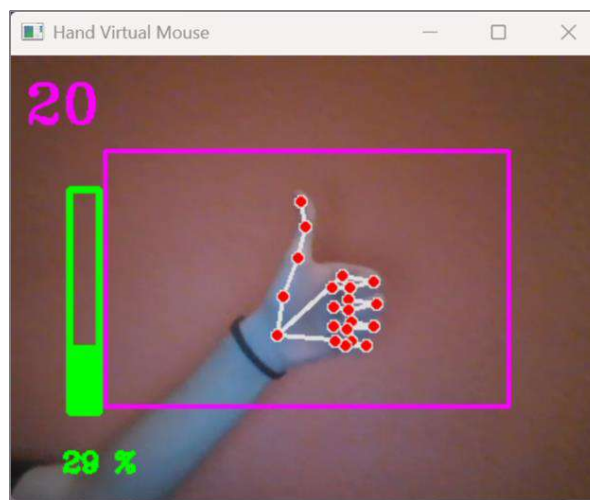


Рис.1 – Інтерфейс програми

Наступним кроком стала перевірка базових функцій. Підняття вказівного пальця та його переміщення в межах рамки активувало рух курсору миші по екрану (рис. 2).

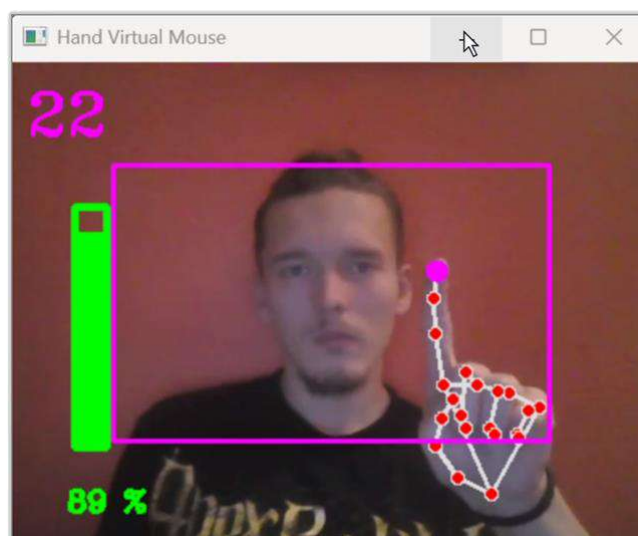


Рис.2 – Рух курсору

Для виконання складніших дій, таких як перетягування файлів або виділення об'єктів, потрібно було підняти вказівний і середній пальці одночасно (рис.3). Зближення цих пальців ініціювало лівий клік, тоді як їхнє розведення на більшу відстань викликало подвійне клацання.

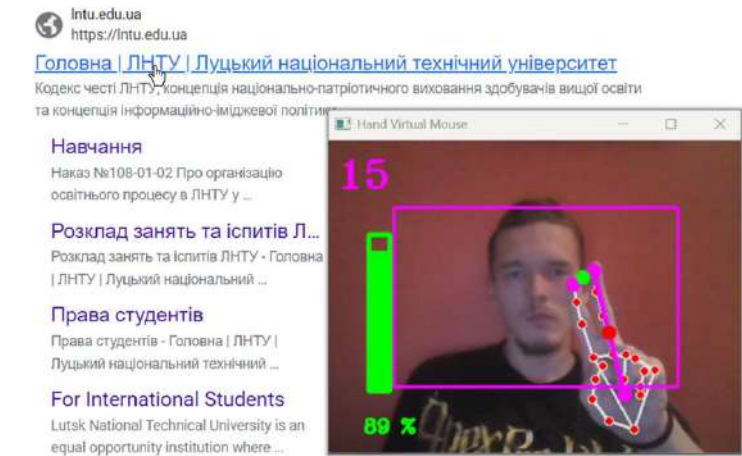


Рис.3 – Лівий клік миші

Додавання безіменного пальця до комбінації забезпечувало правий клік (рис.4), що розширювало функціональність системи.



Рис. 4 – Правий клік миші

Для прокручування сторінок вгору або вниз користувач мав закрити всі пальці, крім великого, рух якого визначав напрямок (рис.5).

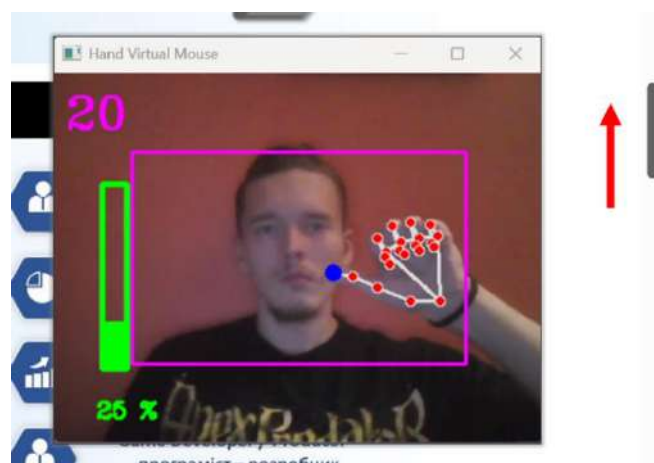


Рис. 5 – Прокручування

Вертикальні рухи руки з відкритими пальцями, крім великого, дозволяли змінювати гучність: підняття руки збільшувало рівень звуку, опускання – зменшувало. Ці зміни візуалізувалися на шкалі та підтверджувалися відображенням на панелі завдань Windows (рис.6).

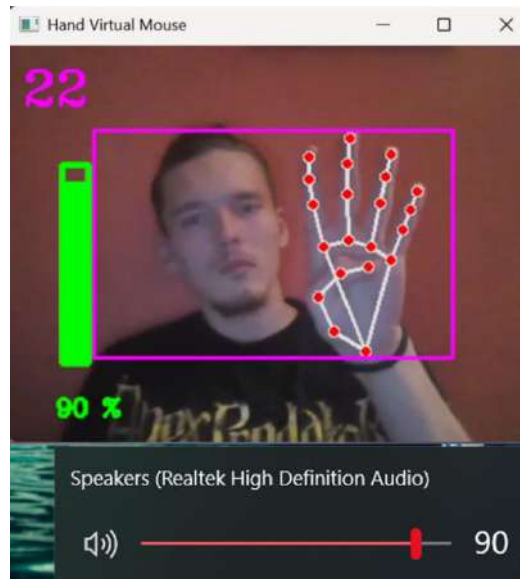


Рис.6 – Регулювання гучності

Окремим результатом тестування стала підтвердження універсальності системи: вона коректно працювала як з лівою, так і з правою рукою, надаючи користувачам свободу вибору. Це забезпечило інтуїтивність взаємодії та зручність у різних сценаріях використання.

Для оцінки продуктивності розробленого програмного забезпечення було проведено серію тестів за участю 8 користувачів. Важливо зазначити, що код програми залишався незмінним на всіх етапах, що дозволило виключити сторонні фактори впливу на результати. Тестування охопило різні апаратні конфігурації: стаціонарні комп'ютери, ноутбуки, вбудовані та зовнішні камери з різною роздільною здатністю. Додатково враховано відстань від веб-камери та умови освітлення, щоб імітувати реальні сценарії використання.

Кожен учасник виконував 10 спроб для кожного жесту, що дозволило отримати середні значення для трьох показників: точності розпізнавання, часу реакції системи та стабільності виконання команд. Точність вимірювалася як відсоток успішних спроб, коли система коректно інтерпретувала жест. Час реакції фіксувався від моменту виконання жесту до ініціювання відповідної дії на комп'ютері. Стабільність оцінювалася за 10-бальною шкалою, де користувачі відзначали, наскільки послідовно система реагувала на однакові рухи.

Програмне забезпечення продемонструвало середню точність понад 95% для базових операцій, таких як переміщення курсору та регулювання гучності, тоді як подвійне клацання, яке вимагає синхронного зведення та розведення пальців, показало меншу точність. Час реакції системи коливався в межах 36–54 мс, що відповідає вимогам роботи в реальному часі.

Стабільність жесту оцінювалася через консистентність результатів у різних умовах. Відповідно як і до точності, переміщення курсору та регулювання гучності отримали найкращі результати, тоді як подвійне клацання показало себе гірше. Низька стабільність останнього пояснюється чутливістю до швидкості руху пальців та схожістю жесту з простим клацанням, що іноді призводило до помилкової інтерпретації. Отримані результати всіх показників було узагальнено та зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати показників аналізу функціонування жестів

Жест	Критерії		
	Точність (%)	Реакція (мс)	Стабільність (від 1 до 10)
Переміщення курсору миші	98	42	9,6

Лівий клік	96	39	8,5
Подвійний лівий клік	90	50	7,4
Правий клік	94	42	8,6
Перетягування	96	45	8,8
Скролінг	97	41	8,4
Регулювання гучності	98	42	9,3

Обґрунтування результатів також підтверджується порівнянням з аналогічними рішеннями. Наприклад, система на основі LeapMotion демонструє точність 98% [11], але вимагає спеціалізованого обладнання, тоді як запропонований підхід забезпечує 95% при використанні звичайної веб-камери.

Отримані дані підтверджують, що система ефективно виконує основні функції, але потребує оптимізації для складніших жестів. Наприклад, подвійне клацання можна покращити шляхом впровадження алгоритмів, які аналізують не лише відстань між пальцями, а й динаміку руху. Також варто додати можливість калібрування чутливості під індивідуальні особливості користувачів.

Процес тестування програми виявив ключові напрями для вдосконалення надалі, зокрема, оптимізацію роботи зі складними командами, такими як подвійний лівий клік. Для вирішення цієї проблеми пропонується переглянути логіку обробки цієї команди: замінити жест на більш інтуїтивний або впровадити додаткові алгоритми, що аналізують тривалість та траєкторію руху. Також варто враховувати зовнішні фактори, такі як якість камери та освітлення, розробивши адаптивні механізми, які автоматично коригують параметри розпізнавання.

Майбутні оновлення передбачають розширення функціоналу шляхом додавання нових жестів для керування медіа (пауза, перемикання, масштабування) та системних налаштувань (наприклад, яскравість). Модульна архітектура програми дозволяє легко інтегрувати ці можливості через створення окремих компонентів. Крім того, планується впровадження інструментів, таких як голосовий помічник та віртуальна клавіатура, що зробить систему ще більш універсальною.

Для підвищення безпеки та зручності розробляється механізм активації жестового керування через спеціальну комбінацію рухів, що запобігає випадковим діям. Підтримка розпізнавання двох рук одночасно відкриє можливість виконання складних команд, наприклад, одночасного перетягування об'єктів і регулювання параметрів. Інтерфейс програми також потребує розвитку: планується додати інтерактивний гід із жєстами, контекстні підказки та персоналізовані налаштування, доступні через панель меню. Це спростить освоєння системи для новачків і зробить взаємодію більш ефективною. Важливим рішенням стане розширення підтримки на операційні системи Linux та macOS, що збільшить аудиторію користувачів. Для цього буде використано крос-платформні бібліотеки та адаптовано існуючі модулі під специфіку цих ОС.

Таким чином, система безконтактного керування жєстами має потенціал для перетворення на універсальний інструмент, який поєднує високу точність, зручність та доступність. Реалізація цих ініціатив не лише покращить поточні функції, але й відкриє нові сценарії використання – від побутових задач до професійних середовищ, де безконтактне керування є більш доцільним, аніж використання фізичних пристроїв введення.

Висновки. Розроблено програмний продукт для безконтактного керування комп'ютером за допомогою жестів демонструє високу ефективність у реалізації базових функцій миші, таких як переміщення курсору, виконання натискань, прокрутка та регулювання гучності. Використання технологій комп'ютерного зору OpenCV та відстеження рухів MediaPipe дозволило створити рішення, що працює в режимі реального часу з частотою обробки кадрів до 30 кадрів у секунду, забезпечуючи достатньо плавну взаємодію. Модульна архітектура системи забезпечує гнучкість у розширенні функціоналу, наприклад, додаванні нових жестів або інтеграцію додаткових дій та інструментів, що робить її адаптивною до різних сценаріїв використання.

Експериментальні тести за участю користувачів підтвердили точність розпізнавання жестів на рівні 95% для базових операцій, таких як переміщення курсору та регулювання гучності. Однак складніші дії, зокрема подвійний клік, потребують подальшого вдосконалення алгоритмів для підвищення стабільності. Важливим досягненням є сумісність системи зі звичайними веб-камерами, що значно знижує вартість рішення та робить його доступним для широкого застосування.

Перспективи розвитку системи надалі включають впровадження методів глибокого навчання для підвищення точності розпізнавання складних і комбінованих жестів. Важливим кроком є розширення підтримки на різних операційних системах, що дозволить залучити ширшу аудиторію користувачів. Оптимізація алгоритмів для роботи в умовах нерівномірного освітлення або при частковому перекритті рук підвищить стабільність системи у реальних сценаріях, де ідеальні умови рідко досяжні.

Практична цінність розробки полягає в її потенціалі для використання в промисловості, медицині, віртуальній реальності та для користувачів з обмеженими руховими можливостями. Наприклад, в умовах пандемії система може зменшити ризик передачі інфекцій через мінімізацію контакту з поверхнями. Таким чином, система керування комп'ютером за допомогою жестів є перспективним кроком у напрямку створення інтуїтивних інтерфейсів людино-машинної взаємодії, що відкриває нові можливості для застосування у різних галузях, від побутового використання до критично важливих операцій.

Список бібліографічного опису

1. Mr.E.Sankar, B.Nitish Bharadwaj, A.V.Vignesh.Virtual Mouse Using Hand Gesture. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. Vol. 7. No. 5. May 2023. P. 2-4.
2. P. J. Ezigbo, O. C. Nosiri, E. S. Mbonu, V. Ofor, J. Obichere. Hand Gesture Recognition and Control for Human-Robot Interaction Using Deep Learning. International Journal of Electrical and Electronic Engineering&Telecommunications.Vol. 12.No. 6.November 2023.P. 433-441.
3. Міронов Н. О., Самчук Л. М. Дослідження характеристик та методології системи розпізнавання жестів для безконтактної взаємодії з комп'ютером з використанням технологій ComputerVision. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, Луцьк, 2024. № 57. С. 115-118.
4. S. Shriram, B. Nagaraj, J. Jaya, S. Shankar, P. Ajay. Deep Learning-Based Real-Time AI Virtual Mouse System Using Computer Vision to Avoid COVID-19 Spread. Journal of Healthcare Engineering. 2021. P. 4-7.
5. Mahmoud, Nourelhoda, Fouad, Hassan, Soliman, Ahmed. Smart healthcare solutions using the internet of medical things for hand gesture recognition system. Complex&IntelligentSystems. 2020. P. 7-12.
6. The Python Community. URL:<https://www.python.org/community/>
- 7.MediaPipe Solutions guide. URL: <https://chuoling.github.io/mediapipe/>
- 8.Optical Flow in OpenCV. URL: <https://learnopencv.com/optical-flow-in-opencv/>
- 9.Pynputpackage. URL: <https://pynput.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- 10.Pyсawpackage. URL: <https://pycaw.readthedocs.io/en/latest/index.html>
11. PruthaAtre, SahilBhagat, Nevil Pooniwal, PayalShah. Efficient and Feasible Gesture Controlled Robotic Arm. 2019.P. 34-54.

References

1. Mr.E.Sankar, B.NitishBharadwaj, A.V.Vignesh. Virtual Mouse Using Hand Gesture. International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. Vol. 7. No. 5. May 2023. P. 2-4.
2. P. J. Ezigbo, O. C. Nosiri, E. S. Mbonu, V. Ofor, J. Obichere. Hand Gesture Recognition and Control for Human-Robot Interaction Using Deep Learning. International Journal of Electrical and Electronic Engineering&Telecommunications.Vol. 12.No. 6.November 2023.P. 433-441.
3. Mironov N.O., Samchuk L.M. Study of characteristics and methodology of gesture recognition system for contact less interaction with a computer using Computer Vision technologies: education, science, production, Lutsk, 2024. No 57. P. 115-118.
4. S. Shriram, B. Nagaraj, J. Jaya, S. Shankar, P. Ajay. Deep Learning-Based Real-Time AI Virtual Mouse System Using Computer Vision to Avoid COVID-19 Spread. Journal of Healthcare Engineering. 2021. P. 4-7.
5. Mahmoud, Nourelhoda, Fouad, Hassan, Soliman, Ahmed. Smart healthcare solutions using the internet of medical things for hand gesture recognition system. Complex&IntelligentSystems. 2020. P. 7-12.
6. The Python Community. URL:<https://www.python.org/community/>
- 7.MediaPipe Solutions guide. URL: <https://chuoling.github.io/mediapipe/>
- 8.Optical Flow in Open CV. URL: <https://learnopencv.com/optical-flow-in-opencv/>
- 9.Pynputpackage. URL: <https://pynput.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- 10.Pyсawpackage. URL: <https://pycaw.readthedocs.io/en/latest/index.html>
11. PruthaAtre, SahilBhagat, Nevil Pooniwal, PayalShah. Efficient and Feasible Gesture Controlled Robotic Arm. 2019.P. 34-54.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-11>

УДК 004:02

Мороз Борис Іванович, д.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0002-5625-0864>

Шишацький Олександр Олександрович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0008-6008-7079>

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ВИДІВ ПОМИЛОК В ГЕОПРОСТОРОВІЙ БАЗІ ДАНИХ НА ПРИКЛАДІ ДЕРЖАВНОГО ЗЕМЕЛЬНОГО КАДАСТРУ

Мороз Б. І., Шишацький О.О. Класифікація видів помилок в геопросторовій базі даних на прикладі державного земельного кадастру. У статті досліджено проблему класифікації помилок у геопросторових базах даних на прикладі інформації з Державного земельного кадастру України. Запропоновано розширену класифікацію помилок, яка охоплює атрибутивні, геометричні, топологічні та контекстуальні помилки. Зокрема, розглянуто помилки позиціонування, топологічні порушення, некоректні атрибутивні дані, дублювання та непослідовність даних. Стаття акцентує увагу на важливості автоматизованого виявлення помилок для забезпечення якості геопросторових даних. Зроблено висновок про необхідність подальших досліджень із використанням статистичних методів для ідентифікації аномалій. Запропоновані підходи сприяють підвищенню точності аналізу та підтримують прийняття рішень у геоінформаційних системах.

Ключові слова: геопросторові дані, помилки, класифікація, земельний кадастр, PostGIS.

Moroz B., Shyshatskiy O. Classification of errors in geospatial databases based on the example data of the state land cadastre. The article investigates the issue of error classification in geospatial databases using data of the State Land Cadastre of Ukraine. An extended classification of errors is proposed, including attributive, geometric, topological, and contextual errors. Specifically, it examines positioning errors, topological violations, incorrect attributive data, duplication, and data inconsistency. The article emphasizes the importance of automated error detection to ensure the quality of geospatial data. It concludes with the need for further research using statistical methods for anomaly detection. The proposed approaches enhance analysis accuracy and support decision-making in geographic information systems.

Keywords: geospatial data, errors, classification, land cadastre, PostGIS.

Постановка наукової проблеми. Історично геопросторові дані зберігались у паперовому вигляді, тому люди мало приділяли уваги проблемам, які виникали через неточності та помилки[1]. Так, було відомо що геопросторові набори даних страждають від неточностей, проте спосіб зберігання не давав можливості побачити проблему в цілому. Розвиток комп'ютерних технологій дав поштовх для переходу на цифрові формати зберігання даних. Цей перехід відкрив нові можливості для автоматизації, але також привніс нові виклики.

Внесення даних у геопросторову базу зазвичай включає в себе ручне введення або сканування інформації, що є потенційним джерелом різних помилок через людський фактор, що важко виявити на етапі введення[2]. Цей процес може призвести до появи помилок, таких як дублювання записів, неправильні географічні прив'язки або некоректні атрибути просторових записів. В процесі внесення даних також вносяться і ті помилки, що існували в паперових документах.

Такі помилки в подальшому впливають на прийняття управлінських та юридичних рішень, тому важливо розробити методи для їх автоматизованого виявлення і, за можливості, автоматичного виправлення. Для вирішення цієї наукової проблеми необхідно виконати ряд завдань:

1. Провести аналіз наукової літератури щодо відомих типів помилок і їх причин.
2. Розробити класифікацію помилок за їх типами.
3. Дослідити існуючі методи і алгоритми для автоматизованого пошуку помилок.
4. Створити методи та алгоритми для пошуку помилок.
5. Розробити програму для аналізу геопросторових даних.
6. Провести тестування розробленого програмного забезпечення на реальних даних.

Виконання цих завдань дозволить не лише вирішити окреслену проблему, але й закладе основу для довготривалого забезпечення якості геопросторових даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема пошуку помилок в геоінформаційних системах досліджувалась такими науковцями як Dr. Christopher Ndehedehe[3], Mr. Manuel S Pascual [4] та Dr. Chrisman, Nicholas[2]. У своїх дослідженнях автори пропонують розділяти помилки у геопросторових базах даних на кілька категорій:

1. **Помилки позиціонування.** Ці помилки виникають через неточності в положенні даних на карті. Dr. Christopher Ndehedehe зазначає, що такі помилки можуть бути спричинені масштабом карти, методами картографування або людським фактором [3]. Manuel S. Pascual додає, що переформатування даних, наприклад, зміна проекції, може вносити похибки через неоднозначності перетворення координат[4]. Dr. Chrisman акцентує увагу на важливості позиційної точності, зазначаючи, що різниця у точності між джерелами даних може призводити до накопичення похибок при накладанні шарів.
2. **Топологічні помилки.** До топологічних помилок відносяться порушення геометрії, такі як перетини, прогалини або відсутність з'єднань між елементами. Помилки при введенні в дані ГІС можуть призводити як до спотворення самої геометрії, так і до спотворення загальної картини. До спотворення геометрії відносять утворення вузлів у полігонах, незвичних форм полігонів, пошкоджені вихідні дані. До спотворення загальної картини відносять, наприклад, неспівпадіння точок двох дотичних полігонів, що створює перетин або прогалину.
Dr. Chrisman у своїй роботі також окремо виділяє логічну узгодженість. Він стверджує, що сучасні ГІС можуть автоматично перевіряти наявність логічних помилок, таких як відсутні кордони чи непозначені полігони. Такі перевірки можуть виявити помилки, які були б невидимими на рівні атрибутивної чи позиційної точності. Наприклад, простий розрахунок 'point-in-polygon' може уникнути розміщення умовних буйків на суші або річок за межами їх заплав [2].
3. **Неправильні атрибутивні дані.** Атрибутивні помилки виникають у разі неправильного або некоректного присвоєння характеристик об'єктам. Наприклад, сільськогосподарські угіддя можуть бути позначені як болота. Dr. Christopher Ndehedehe підкреслює, що такі помилки часто пов'язані з людським фактором і суб'єктивністю в класифікації даних.

Результати публікацій свідчать про те, що точність і якість даних є критично важливими для проєктів ГІС. Помилки, неточності та невизначеності можуть серйозно вплинути на результати аналізу.

У той же час, аналіз наявних публікацій виявив недолік: попри значний внесок у дослідження проблеми, автори робіт наводять лише основні типи помилок (позиційні, топологічні, атрибутивні). Класифікація виконана на загальному рівні, без деталізації. Для подальших досліджень необхідно деталізувати наведені авторами види помилок, описати їх визначення та методи пошуку.

Метою статті є формулювання авторського визначення поняття "аномалії у геопросторових базах даних" та уточнення і поглиблення відомих класифікацій помилок для подальшого дослідження алгоритмів для їх ідентифікації.

Виклад основного матеріалу. Проблеми з даними та помилки в геопросторових базах даних можна озагальнити словом "аномалія". Аномалія є відхиленням від очікуваних або стандартних характеристик даних[5], яке у випадку з геопросторовими базами даних може бути результатом помилки, викликаного людським фактором, технічними збоями або спадковими проблемами з першоджерел даних.

У контексті геопросторових даних, аномалії можуть проявлятися у вигляді:

- **Помилки позиціонування:** перетину або накладання об'єктів.
- **Топологічних порушень:** наприклад, об'єктів, які знаходяться поза межами дозволеної області;
- **Невірних атрибутивних даних:** невідповідних категорій об'єктів, характеристик, тощо;

Для аналізу та класифікації видів помилок у межах статті було обрано базу даних земельних ділянок України, що опублікована Державною службою України з питань геодезії, картографії та кадастру протягом 2020-2022 рр. Хоча в земельному кадастрі наявні найрізноманітніші дані (від опорних пунктів геодезичної мережі до координат державного кордону), дослідження в межах цієї статті обмежується лише даними про земельні ділянки та їх атрибути.

На першому етапі було підготовано дані для аналізу. З допомогою програмних засобів було завантажено та поєднано два джерела даних:

- Набір даних про зареєстровані земельні ділянки з офіційного сайту Держгеокадастру [6].
- Прикладний програмний інтерфейс для доступу до відомостей про земельну ділянку [7].

Інформація з відкритих джерел була поєднана і завантажена в геопросторову базу даних, що містить таблицю, поля якої зазначені в таблиці №1. Для зберігання даних використано об'єктно-реляційну базу даних PostgreSQL з встановленим додатком PostGIS, який дозволяє зберігати геопросторові дані. Загальна кількість записів у отриманій таблиці - 24,058,660 рядків.

Таблиця 1. Опис створених полів бази даних

Поле	Опис
CAD_NUM	Кадастровий номер земельної ділянки.
OWNERSHIP_CODE	Код форми власності на земельну ділянку.
OWNERSHIP	Назва форми власності земельної ділянки.
PURPOSE_CODE	Код категорії та призначення земель.
CATEGORY	Назва категорії земель за цільовим призначенням.
PURPOSE	Назва цільового призначення земельної ділянки.
UNIT_AREA	Одиниці виміру площі земельної ділянки.
AREA_SIZE	Числове значення площі земельної ділянки.
GEOMETRY	Геометрія земельної ділянки в проекції EPSG:4326

По завершенню підготовчого етапу, проведено дослідження отриманого набору даних на наявність різних видів помилок. Результатом дослідження стала детальна класифікація видів помилок, наведена нижче.

Помилки атрибуції. Атрибутивна інформація охоплює лише ті поля, які не мають прямого зв'язку з геопросторовими даними чи їх похідними. У цьому розділі розглянуто класифікацію основних типів помилок атрибутивних даних за їхніми характеристиками.

Жирним курсивом наведено коротку назву виду помилок, за яким детально описано визначення помилки та розглянуто механізм виявлення:

1. **Вихід значень атрибуту поза задані обмеження.** Атрибут має обмежений набір допустимих значень або фіксований діапазон, проте фактичні значення атрибуту виходять за межі цих обмежень. Виявлення такого типу помилок виконується поетапно. Розглянемо процес пошуку цих помилок детальніше на прикладі атрибуту OWNERSHIP_CODE у досліджуваному наборі даних.

Запит:		
<pre>SELECT ownership, ownershipcode, count(id) as count FROM parcels_2023 GROUP BY ownership, ownershipcode ORDER BY count DESC;</pre>		
Результати:		
OWNERSHIP	OWNERSHIPCODE	Кількість ділянок
"Приватна власність"	"100"	20255499
"Не визначено"	"0"	1751902
"Комунальна власність"	"200"	1324549
"Державна власність"	"300"	726648
"Не визначено"	"4"	35
"Не визначено"	"1"	12
"Не визначено"	"12"	6
...
"Не визначено"	"21"	1

Рис. 1. Інформація про OWNERSHIPCODE у зрізі за 2022 рік.

Першим етапом перевірки є визначення обмежень. У випадку з земельними ділянками, джерелом таких правил є Положення "Про Порядок ведення Державного земельного кадастру" яке встановлює фіксований набір значень, яке може приймати поле

OWNERSHIP_CODE. Згідно з Додатком 3 Положення [8], можливі значення мають відповідності як зазначено в таблиці №2.

Другим етапом є порівняння отриманих значень із встановленими обмеженнями та виявлення відхилень. Для проведення перевірки було сформовано SQL-запит, який отримує з бази даних усі унікальні значення атрибуту OWNERSHIP_CODE разом із кількістю повторень. Результати виконання запиту наведено на рисунку №1. Отримані результати показують, що у кадастрових даних за 2022 рік атрибут OWNERSHIP_CODE містить 62 записи зі значеннями, які не входять до переліку допустимих.

Таблиця 2. Форми власності земельних ділянок [8].

Код	Форма власності
100	Приватна власність
200	Комунальна власність
300	Державна власність

Крім того, значна кількість записів (1,751,902 або 7.28% від загальної кількості) не містить інформації про форму власності. Для позначення відсутності даних використано код 0, який не передбачено затвердженою документацією, що свідчить про застосування неформального підходу до позначення відсутності інформації.

2. **Відсутні дані.** Атрибути мають порожні значення там, де повинна бути інформація. Перевірку на відсутність даних можливо здійснити шляхом SQL-запиту, який виявляє порожні значення в обраному атрибуті. Розглянемо цей тип помилок на прикладі атрибуту CATEGORY у досліджуваному наборі даних.

SQL-запит для аналізу:

```
SELECT category, count(*)
FROM public.parcels_2022
WHERE category IN (NULL, '')
GROUP BY category;
```

Результати:

CATEGORY	Кількість ділянок
"	79

Рис. 2. Інформація про відсутній атрибут CATEGORY у зрізі за 2022 рік.

Як показано на рисунку № 2, у базі даних виявлено 79 записів, у яких атрибут CATEGORY має порожнє значення. Відсутність даних у цьому полі порушує вимоги щодо повноти зазначення інформації[9].

3. **Неправильний тип даних.** Атрибут містить значення з невідповідним типом даних, наприклад, текст замість числа.

Для виявлення цього виду помилок складено SQL-запит, який перевіряє можливість конвертації значень у числовий формат та сортує їх у порядку спадання. Для перевірки обрано атрибут AREA_SIZE, який за своїм визначенням має бути дробовим числом, однак у досліджуваних наборах відкритих даних він представлений у вигляді текстового типу.

Як показано на рисунку № 3, поле AREA_SIZE містить записи, які не можуть бути перетворені в числовий формат, через що повертається значення NULL. Усього виявлено 21 запис із такими помилками.

Запит:

```

SELECT
  cadnum, area, (
  CASE
    WHEN trim(area) ~ '^-?\d+(\.\d+)?\$$'
      THEN CAST(area AS DECIMAL)
    ELSE NULL
  END) AS area_as_decimal
FROM public.parcels_2022
ORDER BY area_as_decimal DESC
LIMIT 20;

```

Результати:

CADNUM	AREA_SIZE	AREA_SIZE_DECIMAL
"4412700000:12:005:0038"		null
"0122787500:07:001:0280"		null
...
"4411400000:16:003:0056"		null

Рис. 3. Недостовірні значення AREA_SIZE за 2022 рік (усього 21 запис).

4. **Орфографічні помилки.** Дублювання записів, що мають однакове логічне значення, проте внесені в базу даних в різному форматі через орфографічні помилки.

Помилки в написанні можуть ускладнювати пошук та групування даних. У досліджуваному наборі даних це стосується, наприклад, поля PURPOSE, яке відображає призначення земельної ділянки.

Основні підходи до пошуку орфографічних помилок у текстових полях базуються на алгоритмах пошуку схожих текстових рядків: перевірі ключових колізій та методу найближчих сусідів.

Перевірка ключових колізій — передбачає створення альтернативного представлення рядка у вигляді ключа, наприклад, після приведення його у нижній регістр, очищення від розділових знаків, видалення зайвих пробілів, тощо. Усі рядки, які мають однаковий ключ, об'єднуються в одну групу. Цей метод дуже швидкий, але не гнучкий.

Результати:

PURPOSE	Кількість записів
Для ведення особистого селянського господарства	12713
для ведення особистого селянського господарства	9425
для ведення особистого селянського господарства	137
Для ведення особистого селянського господарства.	39
Для ведення особистого селянського господарства	28
Для ведення особистого селянського господарства	17
Для ведення особистого селянського господарства,	10

Рис. 4. Приклади варіацій атрибуту "PURPOSE" знайдені методом Key Colision.

Метод найближчих сусідів — використовує параметр, що визначає поріг відстані: будь-які рядки, відстань між якими менша за задане значення, будуть включені в одну групу разом. Цей метод дозволяє точніше регулювати відмінності між рядками, але потребує великих обчислювальних ресурсів, оскільки потрібно порівнювати всі пари рядків, що уповільнює процес для великих наборів даних.

Результати:

PURPOSE	Кількість записів
Для ведення особистого селянського господарства	12713
для ведення особистого селянського господарства	9425
для ведення особистого селянського господарства	137
Для ведення особистого селянського господарства.	39
Для ведення особистого селянського господарства,	10
"Для ведення особистого селянського господарства"	2
- Для ведення особистого селянського господарства	2
.Для ведення особистого селянського господарства	1
Для ведення особистогоселянського господарства	1
для ведення особистого селянськогогосподарства	1
для ведення особистогоселянського господарства	1
для веденняособистого селянського господарства	1

Рис. 5. Приклади варіацій атрибуту "PURPOSE" знайдені методом Nearest Neighbor.

На рисунках №№ 4, 5, продемонстрована перевага алгоритму найближчих сусідів над ключовими колізіями у пошуку орфографічних помилок: завдяки гнучкості параметризованого радіусу вдалося знайти додатково такі помилки:

- Використання символів ' та '-' для обрамлення запису.
- Помилки у написанні слів (відсутність розділового знаку): "особистогоселянського" та "селянськогогосподарства".

5. **Непослідовність даних.** Атрибути, що повинні бути узгодженими, мають різні значення. Для перевірки непослідовності даних створимо SQL-запит, який витягне з бази даних інформацію про всі пари значень атрибутів OWNERSHIP та OWNERSHIPCODE, а також кількість таких записів.

Запит:

```
SELECT ownership, ownershipcode, count(id) as count
FROM parcels_2023
GROUP BY ownership, ownershipcode
ORDER BY count DESC;
```

Результати:

OWNERSHIP	OWNERSHIPCODE	Кількість ділянок
"Приватна власність"	"100"	20255499
"Не визначено"	"0"	1751902
"Комунальна власність"	"200"	1324549
"Державна власність"	"300"	726648
"Не визначено"	"4"	35
"Не визначено"	"1"	12
"Не визначено"	"12"	6
...
"Не визначено"	"21"	1

Рис. 6. Інформація про OWNERSHIP та OWNERSHIPCODE.

На рисунку № 6 показано, що основна кількість ділянок має однозначне зіставлення між полем OWNERSHIP та OWNERSHIPCODE, проте, існують невеликі групи записів з різними значеннями OWNERSHIPCODE, але з OWNERSHIP = "Не визначено". Ці записи не мають чіткої ідентифікації типу власності і скоріше за все були занесені помилково.

6. **Неправильні значення.** Атрибути мають значення, які виходять за межі допустимих або не відповідають реальності. Наприклад, від'ємна площа.

Поле AREA_SIZE за своїм визначенням є дробовим числом, проте у наборах відкритих даних представлено у вигляді строкового типу. Зважаючи на це, складемо SQL запит таким чином, аби він одночасно конвертував значення в число та сортував значення від більшого до меншого.

Запит:

```

SELECT
  cadnum, area, (
    CASE
      WHEN trim(area) ~ '^-?\d+(\.\d+)?\$$'
      THEN CAST(area AS DECIMAL)
      ELSE NULL
    END) AS area_as_decimal
FROM public.parcels_2022
ORDER BY area_as_decimal DESC
LIMIT 20;

```

Результати:

CADNUM	AREA_SIZE	AREA_SIZE DECIMAL
"2320681002:01:003:0001"	"1410819481.2743"	1410819481.2743
"2324580600:01:004:0045"	"1385675089.7042"	1385675089.7042
"3222487200:04:006:0094"	"937517730.8986"	937517730.8986
"3222487200:04:001:0040"	"937365803.7717"	937365803.7717
"1822383800:03:000:0135"	"916102795.6748"	916102795.6748

Рис. 7. Аномально великі значення AREA_SIZE.

На рисунку № 7 наведено приклад значень AREA_SIZE, які є аномально великими площами, на кшталт 1410819481.2743 га. Число 1,410,819,481 (або близько 1.41 мільярда гектар) є надзвичайно великим. Для порівняння: загальна площа України становить приблизно 603,500 квадратних кілометрів, що еквівалентно 60.35 мільйона гектар. Таким чином, 1.41 мільярда гектар перевищує площу України більш ніж у 20 разів.

Помилки геометрії. У геопросторових базах даних можуть також виникати різноманітні топологічні помилки, пов'язані з геометрією. У цьому розділі розглянуто помилки, що стосуються полігональних об'єктів, адже саме такий вид об'єктів використовується у базі даних земельних ділянок.

Індивідуальні помилки. Цей вид помилок відносяться до тих, що можуть бути визначені для індивідуального об'єкту окремо від контексту, тобто без врахування його сусідів або атрибутів. Такі помилки можуть суттєво впливати на точність і надійність геопросторового аналізу, тому важливо проводити валідацію та корекцію топології в базах даних.

Класифікація індивідуальних помилок полігональних об'єктів. Як і в попередньому розділі, **жирним курсивом** наведено коротку назву виду помилок, за яким детально описано визначення помилки та розглянуто механізм виявлення:

1. **Самоперетин.** Контур одного полігону або лінії перетинається сам із собою, як показано на рис. 8. Може бути наслідком помилки при введенні даних, спрощення або похибки при конвертації між різними проекціями.

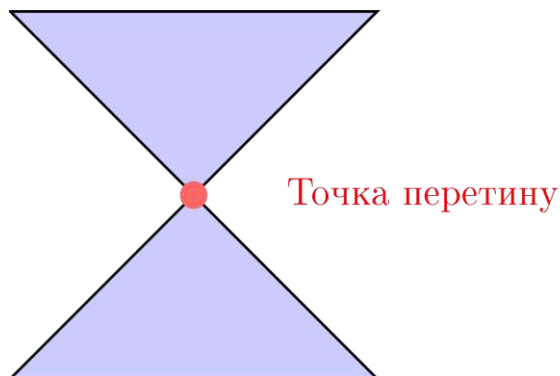


Рис. 8. Приклад самоперетину полігону.

2. **Невірне замикання.** Полігони мають незамкнені контури, що порушує їхню цілісність, як показано на рис. 9. Виникає, коли координати кінцевих точок полігона не співпадають з його початковими точками, що призводить до розриву контурів.

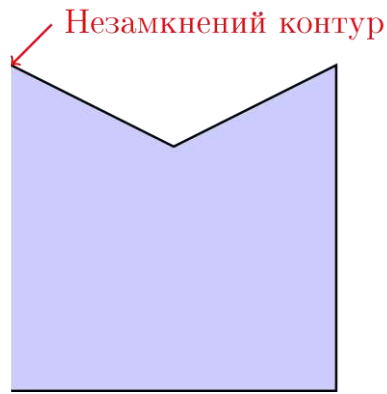


Рис. 9. Приклад незамкнутого контуру полігону

3. **Дублікати ребер.** Полігони мають задубльовані ребра. Ребра дублюються, що спотворює представлення полігону, як показано на рис. 10.

Дубльоване ребро

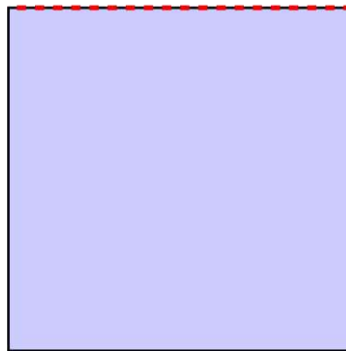
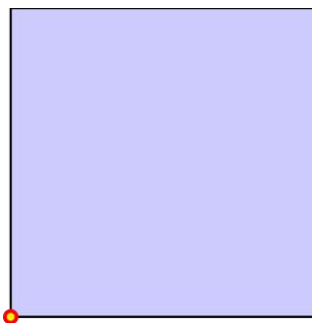


Рис. 10. Дублікати ребер.

Ця проблема може виникати через невірне визначення або обробку координат, коли одні й ті самі ребра заново вводяться або не правильно об'єднуються.

4. **Дублікати вершин.** Полігони мають задубльовані вершини. Ця проблема може спотворювати представлення геометрії, утруднювати аналіз та перевірку топології полігонів, як показано на рис. 11. Задубльовані вершини виникають через помилки в обробці даних, наприклад, при некоректній конверсії форматів або редагуванні геометрії.



Дублікат вершини

Рис. 11. Приклад дублікату вершини.

5. **Отвори поза контуром.** Полігони мають отвори, що розташовані поза основним контуром полігону, як показано на рисунку. 12. Виникає, коли внутрішні області полігона помилково визначені поза його межами.

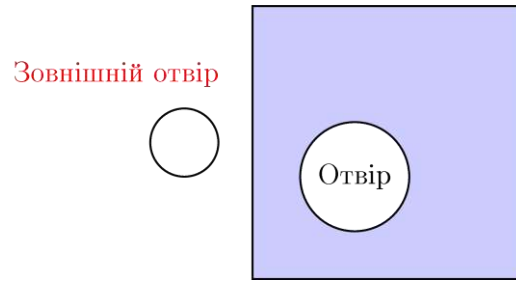


Рис. 12 . Приклад отвору поза контуром полігона.

6. **Роз'єднані частини.** Полігони мають отвори, які розрізають полігон на декілька не з'єднаних частин, як показано на рисунку № 13.

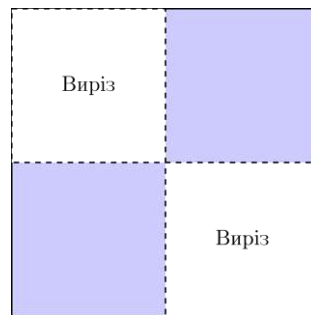


Рис. 13. Роз'єднані частини

Одним із методів для аналізу коректності індивідуальних полігональних об'єктів в середовищі PostGIS є використання функції ST_IsValidDetail. Ця функція дозволяє отримати детальну інформацію про причину невалідності геометрії.

Для виконання такого аналізу можна скористатися SQL-запитом. Результати можна згрупувати за причинами невалідності геометрії, таким чином визначивши основні типи помилок та їх поширення, що і продемонстровано на рисунку № 14.

Результати свідчать, що понад 29 000 земельних ділянок мають помилки типу Self-intersection, що становить майже 90% усіх випадків. Значна частина помилок також пов'язана з перетинами кільцевих структур (Ring Self-intersection), що часто свідчить про проблеми під час створення або обробки геометрії.

SQL-запит для аналізу геометрії:

```
SELECT reason(ST_IsValidDetail(geometry::geometry)) AS reason, count(*)
FROM public.parcels_2022
GROUP BY reason;
```

Результати:

Причина помилки	Кількість ділянок
Self-intersection	29587
Ring Self-intersection	2901
Duplicate Rings	232
Interior is disconnected	7
Hole lies outside shell	1

Рис. 14. Статистика помилок геометрії земельних ділянок.

Серед рідкісних помилок можна виділити проблеми типу Interior is disconnected (7 випадків) та Hole lies outside shell (1 випадок), які свідчать про серйозні порушення цілісності геометрії. Водночас, кількість геометрії з помилками відносно загального об'єму бази даних становить лише 0.12%.

Важливо зазначити, що перевірка геометрії в PostGIS базується виключно на евклідовій геометрії, без урахування еліпсоїдальної форми Землі, що може впливати на результати для даних глобального масштабу. Для таких випадків необхідний додатковий аналіз із використанням геодезичних функцій.

Контекстуальні помилки. Цей вид помилок може бути визначений лише врахувавши контекст об'єкту, тобто його сусідів, атрибутів, відношення до інших об'єктів. Основні види помилок наведені нижче.

1. **Перетин з сусідніми об'єктами.** Полігони або лінії, що мають бути суміжними, перетинаються, як показано на рис. 15. Помилка виникає коли координати суміжних точок не використовують повторно, а визначають окремими і незалежними вимірюваннями, що призводить до внесення похибки в кожному з вимірювань.

Крім того, помилка може бути результатом того, що координати для сусідніх об'єктів визначено в різних системах координат. У такому випадку спроба перетворення координат у єдиний формат спричиняє похибки при конвертації, що призводить до утворення перетинів або розривів між об'єктами.

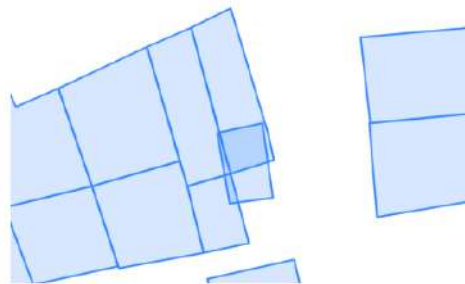


Рис. 15. Приклад накладання полігону на сусіда.

2. **Розриви.** Проміжки між полігонами, які повинні щільно прилягати один до одного, як показано на рис. 16.

Помилка виникає, коли координати суміжних об'єктів, таких як полігони, визначаються окремо та незалежно для кожного з сусідніх об'єктів, що призводить до виникнення похибок.

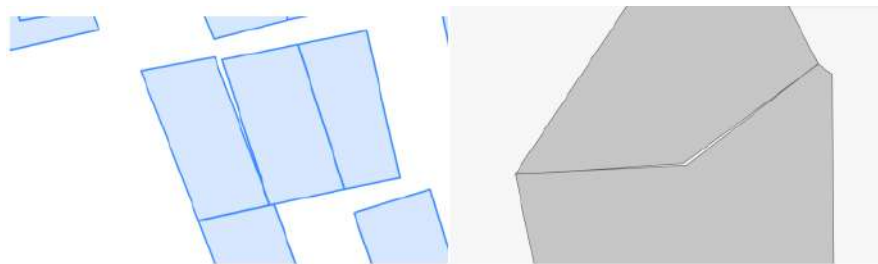


Рис. 16. Приклади розривів між суміжними полігонами.

3. **Перетин із забороненими областями.** Геометричні об'єкти, які перетинають області, де вони не повинні перебувати, як показано на рис. 17.

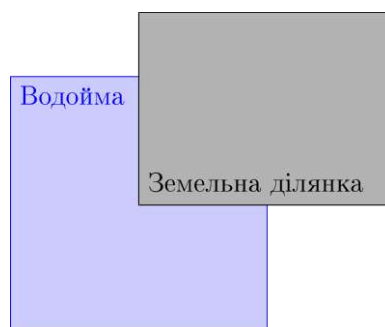


Рис. 17. Ілюстрація ділянки, що перетинає водойму.

Помилка виникає, коли полігони або інші геометричні елементи, такі як дороги, будівлі чи водойми, мають неправильне просторове розташування відносно інших об'єктів або шарів даних. Помилка часто є наслідком неточності в координатах або відсутності топологічної узгодженості між різними наборами даних.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного аналізу відкритих даних Державного земельного кадастру було виявлено кілька категорій помилок, що можуть суттєво впливати на точність, достовірність і практичну цінність інформації в геопросторових базах даних.

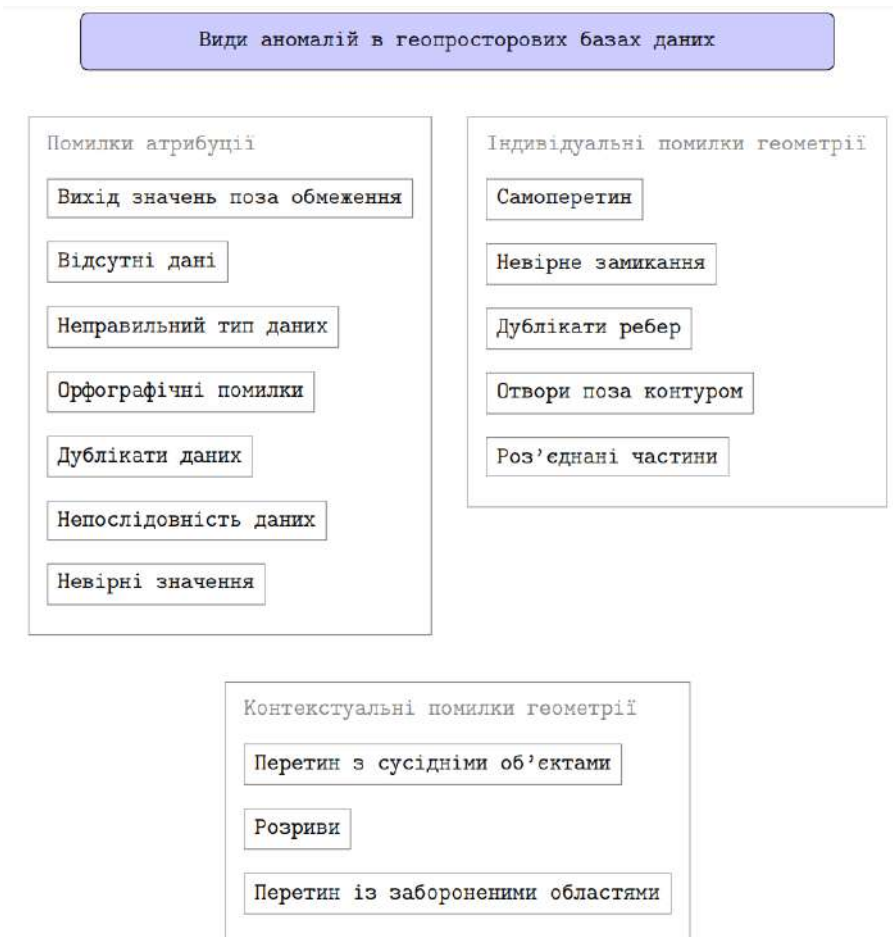


Рис. 18. Візуальна класифікація видів аномалій.

Основними досягненнями дослідження є такі:

1. **Розширення класифікації помилок:** На основі аналізу існуючих досліджень та результатів роботи з даними було створено розширену класифікацію помилок, яка наведена нижче в скороченій формі у вигляді ілюстрації представленої на рисунку № 18.
2. **Ідентифікація недоліків існуючих підходів:** Аналіз літератури та практичних прикладів показав, що існуючі класифікації не є універсальними, а рівень деталізації часто недостатній для вирішення практичних задач.
3. **Візуалізація помилок:** Для покращення розуміння проблеми було створено низку графічних ілюстрацій, що демонструють поширені типи помилок, такі як самоперетини, незамкнені контури, дублікати вершин і отворів поза межами полігонів.

Класифікація помилок є лише першим етапом у більш широкому процесі аналізу геопросторових даних, що спрямований на виявлення аномалій. Пошук аномалій — це наступний крок, який призначений для виявлення нетипових значень, які можуть бути результатом неточностей у даних. Подальше дослідження буде зосереджено на застосуванні статистичних методів для виявлення аномалій. Зокрема, буде використовуватись статистичний аналіз, включаючи методи класифікації,

кластеризації, а також виявлення залежностей між різними атрибутами. Статистичні методи дозволять виявити незвичайні патерни в даних, що можуть свідчити про неточності або проблеми з якістю інформації, не завжди очевидні через традиційні підходи до перевірки помилок. Завдяки застосуванню таких методів, можна буде виявити не тільки очевидні помилки, а й більш складні аномалії, що не мають явних ознак помилок, але можуть суттєво впливати на точність аналізу та прийняття рішень. Це дозволить значно покращити якість геопросторових баз даних.

Список бібліографічного опису.

1. Tsorlini A., Gavrilis D., Makridis S. An example of studying the evolution of a local geographic milieu in early 20th century Greece: Generalkarte (1900-1904) vs National mapping (1917) representations // Proceedings of 5th International Workshop Digital Approaches to Cartographic Heritage, Vienna, Austria. 2010. С. 22–24.
2. Chrisman N. R. The error component in spatial data // Geographical information systems. 1991. Т. 1. №12. С. 165–174.
3. Ndehedehe C. Understanding Errors and their Measurement in Geoinformation // Journal of Environmental Sciences and Resources Management. 2013.
4. Pascual M. S. GIS Data: A Look at Accuracy, Precision, and Types of Errors. URL: <https://www.geographyrealm.com/gis-data-a-look-at-accuracy-precision-and-types-of-errors/> (дата звернення: 10.11.2024).
5. Академічний тлумачний словник Української мови. URL: <https://sum.in.ua/s/anomalija> (дата звернення 10.11.2024).
6. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. Набір даних про зареєстровані земельні ділянки. 2022. URL: <https://web.archive.org/web/20220204115835/https://data.land.gov.ua/> (дата звернення: 10.11.2024).
7. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. API Е-сервіса Держгеокадастру. 2021. URL: <https://web.archive.org/web/20210713075141/https://e.land.gov.ua/api/doc> (дата звернення: 10.11.2024).
8. Верховна Рада України. Додаток 18 до Порядку ведення Державного земельного кадастру. Код форми власності на земельну ділянку. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051a-2012-p/ed20230411#n54> (дата звернення: 10.11.2024).
9. Верховна Рада України. Додаток 3 до Порядку ведення Державного земельного кадастру. Категорії земель. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/10516-2012-p/ed20230208#n6> (дата звернення: 10.11.2024).

References:

1. Tsorlini A., Gavrilis D., Makridis S. An example of studying the evolution of a local geographic milieu in early 20th century Greece: Generalkarte (1900-1904) vs National mapping (1917) representations. Proceedings of 5th International Workshop Digital Approaches to Cartographic Heritage, Vienna, Austria. 2010. pp. 22–24.
2. Chrisman N. R. The error component in spatial data. Geographical information systems. 1991. Vol. 1, No. 12, pp. 165–174.
3. Ndehedehe C. Understanding Errors and their Measurement in Geoinformation. Journal of Environmental Sciences and Resources Management. 2013.
4. Pascual M. S. GIS Data: A Look at Accuracy, Precision, and Types of Errors. URL: <https://www.geographyrealm.com/gis-data-a-look-at-accuracy-precision-and-types-of-errors/> (access date: 10.11.2024).
5. Akademichnij tлумachnij slovník. URL: <https://sum.in.ua/s/anomalija> (access date: 10.11.2024).
6. Derzhavna Sluzhba Ukrainy z Pytan Heodezii, Kartohrafii ta Kadastru. Nabor danykh pro zareiestrovani zemelni dilianky. 2022. URL: <https://web.archive.org/web/20220204115835/https://data.land.gov.ua/> (access date: 10.11.2024).
7. Derzhavna Sluzhba Ukrainy z Pytan Heodezii, Kartohrafii ta Kadastru. API E-servisa Derzhheokadastru. 2021. URL: <https://web.archive.org/web/20210713075141/https://e.land.gov.ua/api/doc> (access date: 10.11.2024).
8. Verkhovna Rada Ukrainy. Dodatek 18 do Poriadku vedennia Derzhavnoho zemelnoho kadastru. Kod formy vlasnosti na zemelnu dilianku. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051a-2012-p/ed20230411#n54> (access date: 10.11.2024).
9. Verkhovna Rada Ukrainy. Dodatek 3 do Poriadku vedennia Derzhavnoho zemelnoho kadastru. Katehorii zemel. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/10516-2012-p/ed20230208#n6> (access date: 10.11.2024).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-12>

УДК 004:09

Мосій Любомир Євгенійович¹, аспірант

<https://orcid.org/0009-0000-9778-331X>

Сверстюк Андрій Степанович^{1,2}, д.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0001-8644-0776>

¹ Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна

² Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, м. Тернопіль, Україна

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛІВ

Мосій Л.Є., Сверстюк А.С. Методи моделювання та класифікації електрокардіосигналів. У статті проведено ґрунтовний аналіз методів моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів на основі дослідження публікацій у наукометричній базі Web of Science Core Collection за 2014-2024 роки. Проаналізовано 513 наукових праць, що відображають динаміку розвитку підходів до інтерпретації кардіологічних даних. Бібліометричний аналіз виявив зростання публікаційної активності з максимальними показниками у 2019 році (58 публікацій), 2022 році (51 публікація) та 2024 році (54 публікації), що підтверджує актуальність досліджуваної тематики. На основі ключових слів публікацій створено хмару термінів, яка демонструє превалювання таких концептів як електрокардіосигнал, глибинне навчання, класифікація, опрацювання сигналів та варіабельність серцевого ритму. Методологічний аналіз засвідчив еволюцію підходів від традиційних методів цифрової обробки сигналів до впровадження інноваційних технологій штучного інтелекту. Зокрема, досліджено ефективність застосування згорткових нейронних мереж для класифікації електрокардіосигналів, які демонструють точність понад 95% при діагностуванні різних типів аритмій. Географічний розподіл публікацій показав лідерство наукових установ США (19% публікацій), Індії (12%), Німеччини (10%) та Китаю (9%). За тематичним спрямуванням переважають дослідження в галузі інженерії (51% публікацій) та комп'ютерних наук (29%), що підкреслює міждисциплінарність проблематики. Визначено пріоритетні напрями розвитку методів аналізу ЕКС: розробка адаптивних алгоритмів фільтрації завад, вдосконалення методів екстракції діагностично значущих ознак, створення інтелектуальних систем класифікації на основі гібридних архітектур. Особливу увагу приділено синергії методів машинного навчання з класичними підходами до аналізу ЕКС для підвищення достовірності діагностування серцево-судинних патологій.

Ключові слова: електрокардіосигнал (ЕКС), модель, метод, аналіз, класифікація, алгоритм, оцінка, нейронна мережа (NN, DNN, ANN, CNN), штучний інтелект (AI), система машинного навчання (MLS), ритм серця.

Mosiy L., Sverstiuk A. Methods of modeling and classification of electrocardiograms. The article thoroughly analyzes methods for modeling, processing, and classifying electrocardio signals based on the study of publications in the scientometric database Web of Science Core Collection for 2014-2024. 513 scientific papers reflecting the dynamics of the development of approaches to interpreting cardiac data were analyzed. Bibliometric analysis revealed an increase in publication activity with maximum indicators in 2019 (58 publications), 2022 (51 publications), and 2024 (54 publications), which confirms the relevance of the topic under study. Based on the keywords of the publications, a term cloud has been created, which demonstrates the prevalence of such concepts as electrocardio signal, deep learning, classification, signal processing, and heart rate variability. Methodological analysis has shown the evolution of approaches from traditional methods of digital signal processing to the introduction of innovative artificial intelligence technologies. In particular, the effectiveness of the use of convolutional neural networks for the classification of electrocardio signals that demonstrate an accuracy of more than 95% in diagnosing various types of arrhythmias has been investigated. The geographical distribution of publications showed the leadership of scientific institutions in the United States (19% of publications), India (12%), Germany (10%), and China (9%). The thematic direction is dominated by research in the field of engineering (51% of publications) and computer science (29%), which emphasizes the interdisciplinarity of the problem. The priority directions for the development of methods for analyzing ESN have been identified: the development of adaptive algorithms for filtering interference, the improvement of methods for extraction of diagnostically significant features, and the creation of intelligent classification systems based on hybrid architectures. Particular attention is paid to the synergy of machine learning methods with classical approaches to the analysis of ECS to increase the reliability of diagnosing cardiovascular pathologies.

Keywords: electrocardiogram (ECG), model, method, analysis, classification, algorithm, evaluation, neural network (NN, DNN, ANN, CNN), artificial intelligence (AI), machine learning system (MLS), heart rate.

Постановка проблеми. Сучасна діагностика серцево-судинних захворювань потребує оптимізації процесів опрацювання та аналізу електрокардіосигналів (ЕКС). Актуальність даної проблематики зумовлена значною поширеністю кардіологічних патологій та високими показниками смертності від них у всьому світі [1]. Інтенсивний розвиток технологій машинного навчання та штучного інтелекту створює перспективи вдосконалення методологічного інструментарію моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів. Тому систематизований аналіз сучасного стану наукових досліджень у зазначеній галузі набуває особливого значення для вивчення перспективних векторів розвитку та методологічних парадигм аналізу ЕКС. Представлене дослідження має на меті здійснення комплексного аналітичного огляду

наукових публікацій щодо методів моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів за десятирічний період на основі бібліометричних даних Web of Science Core Collection.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В аналітичному огляді досліджень щодо еволюції аналізу сигналів ЕКГ за останні десять років розглядаються різні підходи до моделювання сигналів ЕКГ, як от застосування дерев прийняття рішень для прогнозування настання серцевих захворювань [2], обґрунтування та верифікації математичної моделі синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів [3], математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів [4], імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики [5]. Інтеграція передових обчислювальних інструментів, таких як алгоритми машинного навчання [6-7] та штучний інтелект [8-9], зробила революцію в цій галузі, дозволивши більш точно та в режимі реального часу аналізувати сигнали ЕКГ. Також розглянутий прогрес в обробці, характеристичі та класифікації ЕКГ-сигналів: від традиційної обробки до підходів машинного навчання та штучного інтелекту [10-12].

Мета дослідження. Провести ґрунтовний огляд публікацій щодо моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів на основі бібліометричних даних Web of Science Core Collection за останнє десятиліття в розрізі кількості робіт за роками, типами публікацій, авторами, країнами, організаціями, категоріями Web of Science, напрямками досліджень та динамікою цитувань. Розглянути найбільш релевантні статті, проаналізувати як традиційні підходи, наприклад, спектральний аналіз, вейвлет-перетворення та методи машинного навчання, так і новітні технології, засновані на глибинному навчанні та штучному інтелекті. Особливу увагу приділити основним проблемам, що виникають при обробці ЕКС, зокрема високій варіабельності сигналів, наявності шумів різного походження та необхідності обробки великих обсягів даних у реальному часі. Використати дані наукових публікацій, що підкреслюють актуальність та важливість розвитку методів обробки ЕКС для покращення якості медичної допомоги.

Аналітичний огляд. Наукометрична база Web of Science Core Collection дає можливість організувати релевантний пошук наукових публікацій з вище згаданої тематики. Тому для проведення аналітичного огляду публікацій щодо аналізу методів моделювання, опрацювання та класифікації сигналів ЕКГ за останні десять років був сформований запит для розширеного пошуку: TS=("cardiac signal*") AND (TS=(model*) OR TS=(method*) OR TS=(*cardiogra*) OR TS=(forecast*) OR TS=(automat*) OR TS=(process*) OR TS=(analysis) OR TS=(optimiz*) OR TS=(classification) OR TS=(diagnostic) OR TS=(construction) OR TS=(evaluat*) OR TS=(review) OR TS=("computer system") OR TS=("decision making") OR TS=("expert system") OR TS=(algorithm*) OR TS=(encoding) OR TS=(signal*) OR TS=(detect*) OR TS=("Artificial Intelligence") OR TS=("Machine Learning") OR TS=("Deep Learning") OR TS=("Convolutional Neural Network") OR TS=(biomedic*) OR TS=("Neural Network") OR TS=("Deep Neural Network") OR TS=(heart) OR TS=(numeric*) OR TS=("Artificial Neural Network")) and 2025 or 2024 or 2014 or 2015 or 2016 or 2017 or 2018 or 2019 or 2020 or 2021 or 2022 or 2023 (Publication Years) and Engineering or Computer Science or Cardiovascular System Cardiology or Instruments Instrumentation or Neurosciences Neurology or Science Technology Other Topics or Medical Informatics or Mathematical Computational Biology or Research Experimental Medicine or Mathematics or Automation Control Systems or General Internal Medicine or Robotics or Health Care Sciences Services or Rehabilitation or Education Educational Research (Research Areas) and Engineering Electrical Electronic or Engineering Biomedical or Cardiac Cardiovascular Systems or Computer Science Interdisciplinary Applications or Computer Science Information Systems or Instruments Instrumentation or Neurosciences or Computer Science Artificial Intelligence or Telecommunications or Computer Science Theory Methods or Multidisciplinary Sciences or Medical Informatics or Mathematical Computational Biology or Engineering Multidisciplinary or Medicine Research Experimental or Neuroimaging or Imaging Science Photographic Technology or Computer Science Software Engineering or Clinical Neurology or Automation Control Systems or Computer Science Hardware Architecture or Biochemical Research Methods or Computer Science Cybernetics or Mathematics Interdisciplinary Applications or Robotics or Health Care Sciences Services or Medicine General Internal or Engineering Industrial or Physics Mathematical or Engineering Environmental or Environmental Sciences or Mathematics or Mathematics Applied or Rehabilitation or Remote Sensing (Web of Science Categories).

Результати розширеного пошуку в наукометричній базі Web of Science Core Collection відобразили 513 робіт за останніх 10 років. Ця кількість свідчить про значну увагу дослідників до тематики моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів (ЕКС) як класичними методами, так і за допомогою штучного інтелекту (рис. 1). Найбільша кількість публікацій була у 2018 та 2022 роках (по 51 праці), у 2019 (58 праць) та в 2024 роках (54 праці). Також у 2025 році за один місяць вже є 5 публікацій.

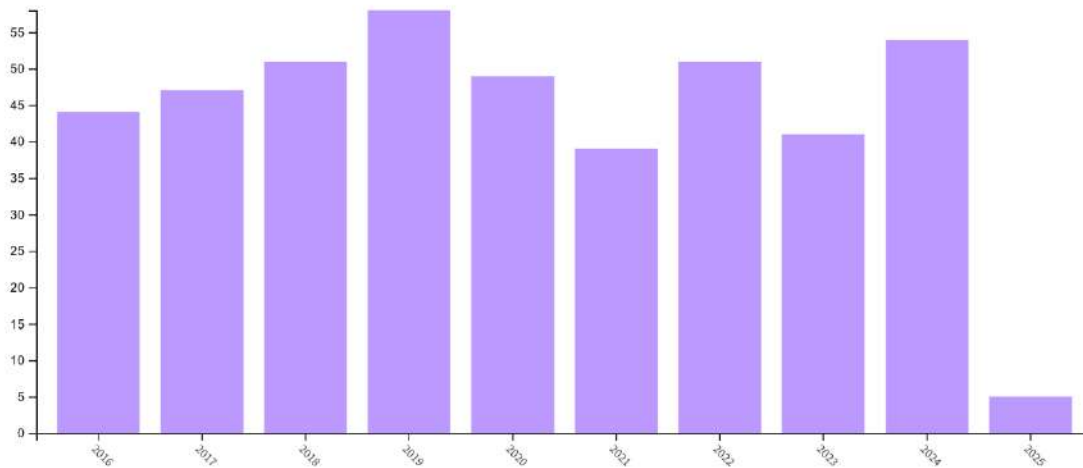


Рис. 1. Динаміка публікацій в наукометричній базі Web of Science Core Collection за роками

Всебічний огляд та аналіз найбільш релевантних статей з методів моделювання, обробки та класифікації кардіосигналів, зокрема електрокардіограм (ЕКГ), показав наступне. Обробка сигналів ЕКГ та своєчасне виявлення патологій серця є важливою задачею збереження життя і здоров'я населення світу. У статті Zhang, T., Lian, C., Xu, B., Su, Y., & Zeng, Z. науковці запропонували нову гібридну архітектуру для аналізу кардіологічних сигналів на основі CNN-розширеної мережі Transformer. Модель використовує систему експертних режимів для обробки як одноmodalьних, так і багатомодальних даних, працюючи у два етапи: виділення модально-специфічних ознак та аналіз міжмодальних взаємодій. Завдяки вдосконаленням на основі CNN модель демонструє кращі результати порівняно з існуючими архітектурами на різних наборах даних [13].

Науковці Giorgio, A., Rizzi, M., & Guaragnella, C. представили ефективний метод виявлення пізніх шлуночкових потенціалів у високороздільних ЕКГ-сигналах, що є маркерами ризику раптової серцевої смерті. Метод складається з трьох етапів: фільтрація та очищення 15-каналних ЕКГ-сигналів від шуму, виділення п'яти ключових ознак, та їх класифікація за допомогою машинного навчання [14]. У статті [15] автори Chintalapati, U. K., Manzar, Md. A. та інші розробили метод класифікації аритмій на основі аналізу основних компонентів ЕКГ-сигналу (P-хвиля, QRS-комплекс та T-хвиля). Для очищення сигналу використано фільтр Савіцького-Голея, який згладжує дані без спотворення їх тенденції. Аналіз проведено на даних з бази MIT-BIH Arrhythmia з використанням Matlab.

Наукові фахівці Aygun, A., Ghasemzadeh, H., & Jafari, R. запропонували новий метод для надійного визначення міжударного інтервалу (IBI) та варіабельності серцевого ритму (HRV) з сигналів, отриманих з носимих сенсорів під час фізичної активності. Метод складається з двох компонентів: комбінаторного алгоритму вибору характерних точок серцебиття в зашумлених сигналах, який базується на пошуку найкоротшого шляху в спрямованому ациклічному графі з урахуванням морфологічних особливостей кардіосигналів та техніки об'єднання фізіологічних параметрів, оцінених з різних морфологічних характеристик [16].

Автори Patra, G. R., Mohapatra, S. K., & Mohanty, M. N. описали новий метод класифікації ЕКГ-сигналів на основі 10-шарової згорткової нейронної мережі. Дослідження показало, що глибокі нейронні мережі, які містять множинні приховані шари, забезпечують кращі результати порівняно з традиційними методами (метод опорних векторів та вейвлет-перетворення) завдяки здатності отримувати багаторівневе представлення даних [17]. Науковці Kaur, P., & Dewan, L. у своїй праці показали новий метод обробки абдомінальної ЕКГ плоду в середовищі LabVIEW для діагностики складних серцевих захворювань. Метод використовує аналіз незалежних компонент (ICA) після

застосування гібридних фільтрів для виділення серцевого сигналу плоду з композитного абдомінального сигналу [18].

Такі учені як Elouaham, S., Dliou, A., Jenkal, W., Louzazni, M., Zougagh, H., & Dlimi, S. описали емпіричне вейвлет-перетворення (EWT) для очищення ЕКГ-сигналів від шуму. EWT розкладає сигнал на частотні компоненти, створюючи спеціалізований вейвлет-базис для детального аналізу. Порівняльний аналіз з іншими методами (DWT-ADTF, FST, Калман, Liouville-Weyl, Wiener) на даних з бази МІТ-ВІН показав переваги EWT у збереженні корисної інформації при видаленні шуму [19]. Стаття дослідників Baghel, N., Dutta, M. K., & Burget, R. відображає автоматичний метод класифікації серцевих захворювань на основі аналізу фонокардіограм з використанням згорткової нейронної мережі (CNN). Для підвищення точності в умовах шуму застосовано техніку аугментації даних. Модель досягла точності 98,60% при діагностиці множинних кардіологічних захворювань [20]. Дослідники D'Aloia, M., Longo, A., & Rizzi, M. у статті [21] надали ефективний метод виявлення та локалізації пікових точок у зашумлених ЕКГ-сигналах. Цей метод використовує перетворення Гільберта та порогову техніку для виявлення зон потенційних піків, з подальшим вейвлет-аналізом для детекції R-піків. Тестування на базі МІТ-ВІН Noise Stress Test Database показало високу ефективність методу навіть при значному рівні шуму (SNR = 6 дБ), досягаючи чутливості 98,13%, що перевершує існуючі алгоритми виявлення R-хвиль.

Автори González-rodríguez, C., Alonso-arévalo, M. A., & García-canseco, E. проводили очищення фонокардіограм (ФКГ) від шуму в частотно-часовій області з використанням U-Net та короткочасного перетворення Фур'є (STFT). На відміну від попередніх досліджень, метод ефективно видаляє чотири типи шумів: білий гаусівський, рожевий гаусівський, мовний та реальний фоновий шум ФКГ. Для вирішення проблеми обмеженості чистих ФКГ-сигналів розроблено метод аугментації даних. Тестування показало високу ефективність навіть при низькому співвідношенні сигнал-шум (-5 дБ), досягаючи покращення від 11,85 до 17,60 дБ [22]. У статті Lyu, X., Rani, S., Manimurugan, S., & Feng, Y. розробили глибоку нейро-нечітку модель з мультимодальним злиттям ознак для аналізу ЕКГ Big Data [23]. Метод поєднує нейро-нечіткі системи з архітектурою Transformer для одночасного аналізу ЕКГ-сигналів та їх спектральних зображень. Тестування на базі МІТ-ВІН Arrhythmia показало високу ефективність методу з точністю 98,46% та F1-мірою 99,1%.

Стаття науковців Sulthana, A., Rahman, Md. Z. U., & Mirza, S. S. пропонує гібридні адаптивні структури фільтрації на основі фільтра Калмана для покращення якості ЕКГ-сигналів при віддаленому моніторингу здоров'я. Метод показав ефективне виділення ЕКГ-сигналу при низькому співвідношенні сигнал-шум, незалежність від параметра розміру кроку, на відміну від традиційних адаптивних фільтрів, використання дискретного вейвлет-перетворення для генерації опорного компонента та низьку обчислювальну складність завдяки комбінації Kalman-LMS з алгоритмами знаків [24]. Учені Raj, S., Ray, K. C., & Shankar, O. описали метод автоматичної діагностики серцевих аритмій з використанням ЕКГ-сигналів, що складається із фільтрації на основі вейвлет-перетворення, виявлення R-піків алгоритмом Пана-Томпкінса, вилучення ознак за допомогою дискретного ортогонального перетворення Стоквелла (DOST) з подальшим зменшенням розмірності методом PCA та комбінуванням з динамічними характеристиками RR-інтервалів та класифікація з використанням SVM, оптимізованого методом PSO. Тестування на базі МІТ-ВІН показало точність 99,18% для 16 класів та 89,10% для 5 класів за стандартом ААМІ, що перевершує існуючі методи та може бути використано для автоматизованої діагностики аритмій [25].

Грунтовне дослідження сучасних методів класифікації ЕКГ-сигналів провели Abdulla, L. A., & Al-Ani, M. S. Автори зосередили увагу на таких основних підходах як штучні нейронні мережі (ANN), згорткові нейронні мережі (CNN), дискретне вейвлет-перетворення (DWT), метод опорних векторів (SVM) та метод k-найближчих сусідів (KNN). Для кожного з них проаналізовано використання наборів даних, методології, результатів та обмежень. Особлива увага приділяється порівняльному аналізу точності класифікації [26]. CNN демонструє найкращі результати серед усіх методів (табл. 1).

Хмара слів, яка відображає ключові слова авторів публікацій бази даних Web of Science Core Collection за досліджуваною тематикою, представлена на рисунку 2.

За типами документів більшість наукових праць склали статті (319 праць або 62%), звітні доповіді (167 праць або 33%) та оглядові статті (22 праці або 4%) (рис. 3).

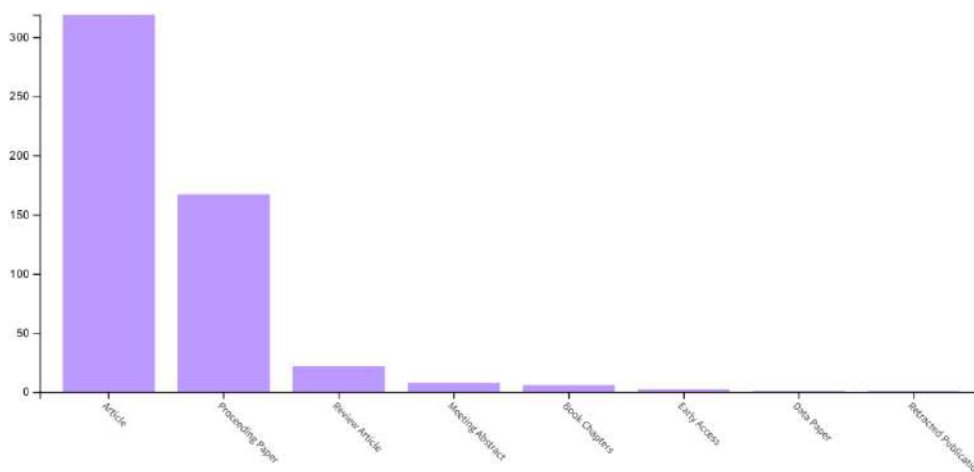


Рис. 3. Кількість праць за типами публікацій

За профілями дослідників бачимо багато науковців з найбільшою кількістю праць – по 6, 5 і 4 праці. Лідери серед профілів дослідників у вивченні цієї проблеми представлені у таблиці 2.

Таблиця 2. Розподіл наукових праць за профілями дослідників

Профілі дослідників	Кількість записів	% of 513
Leonhardt, Steffen	6	1,17
Olde, Bo	6	1,17
Holmer, Mattias	6	1,17
Rojo-Alvarez, Jose Luis	6	1,17
Sandberg, Frida	6	1,17
Sornmo, Leif	5	0,97
Peris-Lopez, Pedro	5	0,97
Antink, Christoph Hoog	5	0,97
Zhu, Tingting	4	0,78
Kiyasseh, Dani	4	0,78
Serdijn, Wouter A.	4	0,78
Munoz-Romero, Sergio	4	0,78
Blanke, Olaf	4	0,78
Sharma, L. N.	4	0,78
Gouveia, Carolina	4	0,78

А розподіл кількості робіт за авторами бачимо теж подібну ситуацію – шість науковців мають по 6 праць, два по 5 праць та одинадцять по 4 праці. Дані представлені у таблиці 3.

Таблиця 3. Розподіл наукових праць за авторами

Автори	Кількість записів	% of 513
Holmer M	6	1,17
Leonhardt S	6	1,17
Olde B	6	1,17
Peris-lopez P	6	1,17
Rojo-alvarez JL	6	1,17
Sandberg F	6	1,17
Antink CH	5	0,97
Sörnmo L	5	0,97
Bhuyan MK	4	0,78
Blanke O	4	0,78
Camara C	4	0,78
Choudhary T	4	0,78
Georgieva-tsaneva G	4	0,78
Gouveia C	4	0,78

García-alberola A	4	0,78
Kiyasseh D	4	0,78
Muñoz-romero S	4	0,78

За категоріями Web of Science найбільше публікацій припадає на: Інженерія, електротехніка, електроніка – 151 робота (29%), Інженерія біомедична – 119 робіт (23%), Кардіологія (серцево-судинна система) – 61 робота (12%), Міждисциплінарні програми з інформатики – 58 робіт (11%), Інформаційні системи – 51 робота (10%), Прилади – 48 робіт (9%), Неврологія – 44 роботи (8%) та Штучний інтелект – 40 робіт (8%) (рис. 4).



Рис. 4. Розподіл кількості праць за категоріями Web of Science

П'ятірка лідерів за кількістю публікацій за приналежністю до організацій складає: University of London – 12 публікацій (2%), University of Oxford – 10 публікацій (2%), Harvard University – 9 публікацій (1,8%), University of California System – 9 публікацій (1,8), Indian Institute of Technology System IT System – 8 публікацій (1,6%) (рис. 5).



Рис. 5. Кількість публікацій в розрізі приналежності до організацій

Найбільша кількість публікацій в розрізі країн або територій належить США – 96 (19%), Індії – 63 (12%), Німеччині – 49 (10%), Китаю – 44 (9%), Сполученому Королівству – 36 (7%), Італії – 30 (6%), Іспанії – 30 (6%), Нідерландам – 20 (4%), Ірану – 19 (4%) та Франції – 17 (3%). Отже, переважно економічно розвинуті країни світу ведуть наукові дослідження з прогнозування та лікування серцево-судинних захворювань (рис. 6).

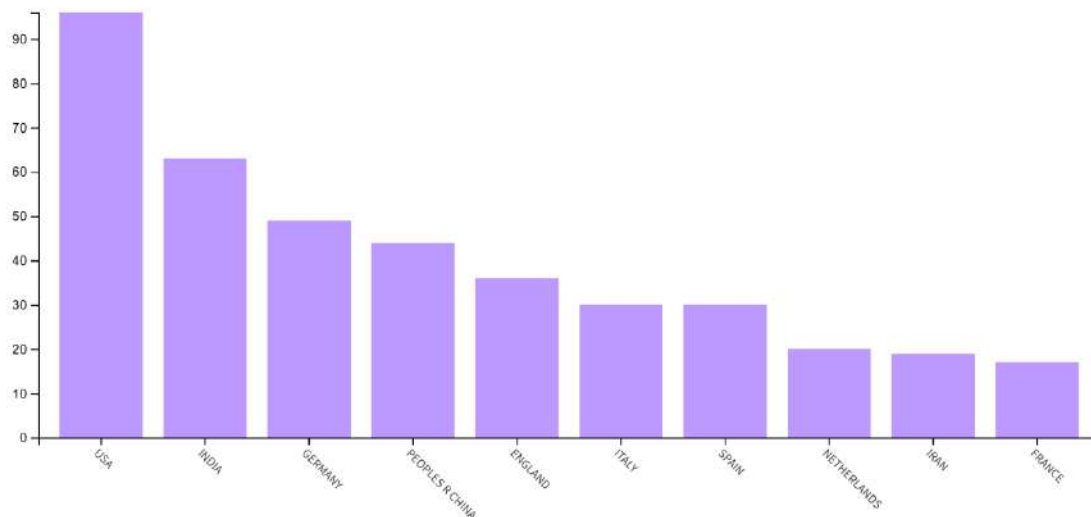


Рис. 6. Кількість публікацій за країнами або територіями

За кількістю публікацій у розрізі видавців лівову частку займає IEEE із третиною всіх публікацій, а наступні Elsevier та Springer Nature мають частки 15 та 12 відсотків (табл. 4).

Таблиця 4. Розподіл наукових праць за видавцями

Видавці	Кількість записів	% of 513
IEEE	171	33,33
Elsevier	78	15,20
Springer Nature	63	12,28
Mdpi	42	8,19
Wiley	23	4,48
Iop Publishing Ltd	13	2,53
NATURE PORTFOLIO	12	2,34
Oxford Univ Press	10	1,95
Assoc Computing Machinery	7	1,37
Lippincott Williams & Wilkins	7	1,37

За напрямками досліджень найбільше публікацій припадає на Інженерію – 262 (51%), Комп'ютерні науки – 149 (29%) та Кардіологію – 61 (12%), що знову підтверджує важливість даного дослідження (табл. 5).

Таблиця 5. Розподіл наукових праць за напрямки досліджень

Напрямки досліджень	Кількість записів	% of 513
Інженерія	262	51,07
Комп'ютерні науки	149	29,04
Кардіологія (серцево-судинна система)	61	11,89
Приладобудування	48	9,35
Неврологія	48	9,35
Наукові технології	37	7,21
Телекомунікації	35	6,82
Хімія	33	6,43
Медична інформатика	23	4,48
Фізика	20	3,90

За результатами аналізу кількості публікацій і цитувань за останнє десятиліття бачимо, що найбільше публікацій було у 2019 році – 59 публікацій і 598 цитувань, далі йде деяке коливання кількості публікацій, але кількість цитувань зате невпинно зростає і досягло піку у 2024 році – 1387 цитувань при кількості публікацій 56 робіт, що підтверджує високий науковий інтерес до науково-

прикладної проблематики дослідження методів моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів (рис. 7).

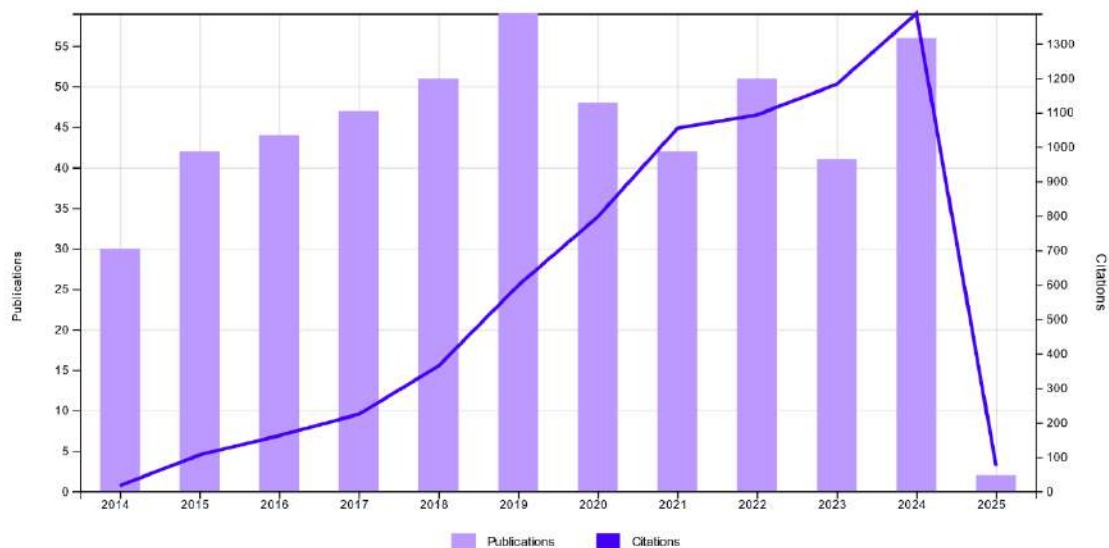


Рис. 7. Результати запити за роками публікацій та цитуванням

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений бібліометричний аналіз публікацій у базі даних Web of Science Core Collection за останнє десятиліття (513 робіт) демонструє стабільний науковий інтерес до проблематики моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів, із піковими показниками публікаційної активності у 2018-2019 та 2022-2024 роках. Виявлено суттєве зростання кількості цитувань досліджень у цій галузі, що досягло максимуму в 2024 році (1387 цитувань), що свідчить про зростаючу актуальність та практичну значущість даної тематики. Встановлено, що найбільший внесок у розвиток методів аналізу ЕКС зробили дослідники зі США (19%), Індії (12%) та Німеччини (10%). Провідними організаціями є University of London, University of Oxford та Harvard University. Аналіз методологічних підходів показав перехід від традиційних методів обробки сигналів до використання передових технологій штучного інтелекту, зокрема: впровадження глибоких нейронних мереж (CNN, DCNN) для класифікації ЕКС з точністю до 99%, розробка гібридних архітектур, що поєднують переваги різних підходів (CNN-Transformer, нейро-нечіткі системи), застосування методів машинного навчання для автоматизованої діагностики серцевих патологій. Виявлено тенденцію до розробки методів, орієнтованих на роботу з портативними пристроями та системами віддаленого моніторингу, що відповідає сучасним потребам телемедицини.

У наших подальших дослідженнях планується провести глибокий аналіз публікацій в інших наукометричних базах, зокрема у CiteSpace та Scopus з метою вивчення існуючих методів моделювання, опрацювання та класифікації електрокардіосигналів, удосконалювати методи глибокого навчання для роботи з обмеженими наборами даних та забезпечення інтерпретованості результатів.

Список бібліографічного опису:

1. Sydorenko, O. L., Kovbasa, N. M., & Deus, V. Ye. (2017). Модифіковані фактори ризику ішемічної хвороби серця у світі. In Медсестринство (Issue 1). Ternopil State Medical University. <https://doi.org/10.11603/2411-1597.2016.1.7388>
2. Kapatsila, R.; Sverstiuk, A. Застосування дерев прийняття рішень для прогнозування настання серцевих захворювань. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, 2023, 53: 317-327.
3. Сверстюк, А. С. Обґрунтування та верифікація математичної моделі синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2009, 1: 143-147.
4. Лупенко, С., Зозуля, А., Сверстюк, А., & Стадник, Н. (2018). Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів. Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (20), (172), 47-54.

5. Литвиненко, Я. В., Лупенко, С. А., Дем'янчук, Н. Р., & Сверстюк, А. С. (2009). Імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики. *Електроніка та системи управління*–К.: НАУ, (4), 22.
6. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>
7. Bondarchuk, O., Kozub, V., & Kozub, Yu. (2024). Аналіз ефективності алгоритмів машинного навчання в обробці великих даних. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 56, pp. 107–116). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-13>
8. Nedashkivskiy, S. (2024). Методологія та принципи виявлення об'єктів за допомогою деформованих згорткових мереж. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 54, pp. 153–159). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-18>
9. Bortnyk, K., Yaroshchuk, B., Bahniuk, N., & Pekh, P. (2023). Overcoming challenges in artificial intelligence training: data limitations, computational costs and model robustness. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 53, pp. 37–43). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-06>
10. Wasimuddin, M., Elleithy, K., Abuzneid, A.-S., Faezipour, M., & Abuzagheh, O. (2020). Stages-Based ECG Signal Analysis From Traditional Signal Processing to Machine Learning Approaches: A Survey. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 177782–177803). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2020.3026968>
11. Feng, C. (2021). The Progress of Processing, Featuring and Classification for ECG Signal. In *2021 IEEE 3rd International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC)* (pp. 391–395). 2021 IEEE 3rd International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icftic54370.2021.9647122>
12. Ardeti, V. A., Kolluru, V. R., Varghese, G. T., & Patjoshi, R. K. (2023). An overview on state-of-the-art electrocardiogram signal processing methods: Traditional to AI-based approaches. In *Expert Systems with Applications* (Vol. 217, p. 119561). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119561>
13. Zhang, T., Lian, C., Xu, B., Su, Y., & Zeng, Z. (2024). Cardiac signals classification via optional multimodal multiscale receptive fields CNN-enhanced Transformer. In *Knowledge-Based Systems* (Vol. 300, p. 112175). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2024.112175>
14. Giorgio, A., Rizzi, M., & Guaragnella, C. (2019). Efficient Detection of Ventricular Late Potentials on ECG Signals Based on Wavelet Denoising and SVM Classification. In *Information* (Vol. 10, Issue 11, p. 328). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/info10110328>
15. Chintalapati, U. K., Manzar, Md. A., N, T. V., A, R., B, P. S., J, R. S., Mirza, K. A., & S, P. K. (2021). Automated Detection of Depolarization and Repolarization of Cardiac Signal for Arrhythmia Classification. In *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)* (Vol. 17, Issue 02, pp. 173–181). International Association of Online Engineering (IAOE). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.18955>
16. Aygun, A., Ghasemzadeh, H., & Jafari, R. (2020). Robust Interbeat Interval and Heart Rate Variability Estimation Method From Various Morphological Features Using Wearable Sensors. In *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* (Vol. 24, Issue 8, pp. 2238–2250). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/jbhi.2019.2962627>
17. Patra, G. R., Mohapatra, S. K., & Mohanty, M. N. (2022). Applications of deep learning algorithms in biomedical signal processing - pros and cons. In *International Journal of Biometrics* (Vol. 14, Issue 1, p. 98). Inderscience Publishers. <https://doi.org/10.1504/ijbm.2022.119560>
18. Kaur, P., & Dewan, L. (2021). LabVIEW-based cardiac risk assessment of foetal ECG signal extracted from maternal abdominal signal. In *International Journal of Computer Applications in Technology* (Vol. 66, Issue 2, p. 115). Inderscience Publishers. <https://doi.org/10.1504/ijcat.2021.119761>
19. Elouaham, S., Dliou, A., Jenkal, W., Louzazni, M., Zougagh, H., & Dlimi, S. (2024). Empirical Wavelet Transform Based ECG Signal Filtering Method. In A. Tani (Ed.), *Journal of Electrical and Computer Engineering* (Vol. 2024, pp. 1–13). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2024/9050909>
20. Baghel, N., Dutta, M. K., & Burget, R. (2020). Automatic diagnosis of multiple cardiac diseases from PCG signals using convolutional neural network. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (Vol. 197, p. 105750). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105750>
21. D'Aloia, M., Longo, A., & Rizzi, M. (2019). Noisy ECG Signal Analysis for Automatic Peak Detection. In *Information* (Vol. 10, Issue 2, p. 35). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/info10020035>
22. González-rodríguez, C., Alonso-arévalo, M. A., & García-canseco, E. (2023). Robust Denoising of Phonocardiogram Signals using Time-Frequency Analysis and U-Nets. In *IEEE Access* (pp. 1–1). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2023.3280453>
23. Lyu, X., Rani, S., Manimurugan, S., & Feng, Y. (2025). A Deep Neuro-Fuzzy Method for ECG Big Data Analysis via Exploring Multimodal Feature Fusion. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* (Vol. 33, Issue 1, pp. 444–456). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2024.3416217>
24. Sulthana, A., Rahman, Md. Z. U., & Mirza, S. S. (2018). An Efficient Kalman Noise Canceller for Cardiac Signal Analysis in Modern Telecardiology Systems. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 34616–34630). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2018.2848201>
25. Raj, S., Ray, K. C., & Shankar, O. (2016). Cardiac arrhythmia beat classification using DOST and PSO tuned SVM. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (Vol. 136, pp. 163–177). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.08.016>

26. Abdulla, L. A., & Al-Ani, M. S. (2020). A Review Study for Electrocardiogram Signal Classification. In *UHD Journal of Science and Technology* (Vol. 4, Issue 1, pp. 103–117). University of Human Development. <https://doi.org/10.21928/uhdjt.v4n1y2020.pp103-117>
27. Zubair, M., Kim, J., & Yoon, C. (2016). An Automated ECG Beat Classification System Using Convolutional Neural Networks. In *2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS)* (pp. 1–5). 2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icitcs.2016.7740310>
28. Yin, W., Yang, X., Zhang, L., & Oki, E. (2016). ECG Monitoring System Integrated with IR-UWB Radar Based on CNN. In *IEEE Access* (pp. 1–1). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2016.2608777>
29. Acharya, U. R., Oh, S. L., Hagiwara, Y., Tan, J. H., Adam, M., Gertych, A., & Tan, R. S. (2017). A deep convolutional neural network model to classify heartbeats. In *Computers in Biology and Medicine* (Vol. 89, pp. 389–396). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2017.08.022>
30. Zhai, X., & Tin, C. (2018). Automated ECG Classification Using Dual Heartbeat Coupling Based on Convolutional Neural Network. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 27465–27472). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2018.2833841>
31. Zhang, J., Tian, J., Cao, Y., Yang, Y., & Xu, X. (2020). Deep time–frequency representation and progressive decision fusion for ECG classification. In *Knowledge-Based Systems* (Vol. 190, p. 105402). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.105402>
32. Wang, J. (2020). A deep learning approach for atrial fibrillation signals classification based on convolutional and modified Elman neural network. In *Future Generation Computer Systems* (Vol. 102, pp. 670–679). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.012>
33. Yao, Q., Wang, R., Fan, X., Liu, J., & Li, Y. (2020). Multi-class Arrhythmia detection from 12-lead varied-length ECG using Attention-based Time-Incremental Convolutional Neural Network. In *Information Fusion* (Vol. 53, pp. 174–182). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.06.024>

References:

1. Sydorenko, O. L., Kovbasa, N. M., & Deus, V. Ye. (2017). Modyfikovani faktory ryzyku ishemichnoi khvoroby sertsia u sviti. In *Medsestrynstvo* (Issue 1). Ternopil State Medical University. <https://doi.org/10.11603/2411-1597.2016.1.7388>
2. Kapatsila, R.; Sverstiuk, A. Zastosuvannya derev pryiniattia rishen dlia prohnozuvannya nastannia sertseyvykh zakhvoriuvan. *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION*, 2023, 53: 317-327.
3. Sverstiuk, A. S. Obruntuvannya ta verifikatsiia matematychnoi modeli synkhronno zareiestrovanykh kardiosyhnaliv z vykorystanniam vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, 2009, 1: 143-147.
4. Lupenko, S., Zozulia, A., Sverstiuk, A., & Stadnyk, N. (2018). Matematychni modeliuvannya ta metody opratsiuvannya syhnaliv sertsia na bazi tsyklichnykh vypadkovykh protsesiv ta vektoriv. *Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI (20), (172), 47-54.
5. Lytvynenko, Ya. V., Lupenko, S. A., Demianchuk, N. R., & Sverstiuk, A. S. (2009). Imitatsiine modeliuvannya synkhronno zareiestrovanykh syhnaliv sertsia na osnovi vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv u zadachakh kardiodiagnostyky. *Elektronika ta systemy upravlinnia–K.*: NAU, (4), 22.
6. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies* (Issue 1, pp. 6–16). Khmelnytskyi National University. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1>
7. Bondarchuk, O., Kozub, V., & Kozub, Yu. (2024). Analiz efektyvnosti alhorytmiv mashynnoho navchannia v obrobtsi velykykh danykh. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 56, pp. 107–116). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-13>
8. Nedashkivskiy, S. (2024). Metodolohiia ta pryntsyipy vyjavlennia obektiv za dopomohoiu deformovanykh zghortkovykh merezh. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 54, pp. 153–159). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-18>
9. Bortnyk, K., Yaroshchuk, B., Bahniuk, N., & Pekh, P. (2023). Overcoming challenges in artificial intelligence training: data limitations, computational costs and model robustness. In *COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION* (Issue 53, pp. 37–43). Lutsk National Technical University. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-06>
10. Wasimuddin, M., Elleithy, K., Abuzneid, A.-S., Faezipour, M., & Abuzagheh, O. (2020). Stages-Based ECG Signal Analysis From Traditional Signal Processing to Machine Learning Approaches: A Survey. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 177782–177803). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2020.3026968>
11. Feng, C. (2021). The Progress of Processing, Featuring and Classification for ECG Signal. In *2021 IEEE 3rd International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC)* (pp. 391–395). 2021 IEEE 3rd International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icftic54370.2021.9647122>
12. Ardeti, V. A., Kolluru, V. R., Varghese, G. T., & Patjoshi, R. K. (2023). An overview on state-of-the-art electrocardiogram signal processing methods: Traditional to AI-based approaches. In *Expert Systems with Applications* (Vol. 217, p. 119561). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119561>
13. Zhang, T., Lian, C., Xu, B., Su, Y., & Zeng, Z. (2024). Cardiac signals classification via optional multimodal multiscale receptive fields CNN-enhanced Transformer. In *Knowledge-Based Systems* (Vol. 300, p. 112175). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2024.112175>

14. Giorgio, A., Rizzi, M., & Guaragnella, C. (2019). Efficient Detection of Ventricular Late Potentials on ECG Signals Based on Wavelet Denoising and SVM Classification. In *Information* (Vol. 10, Issue 11, p. 328). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/info10110328>
15. Chintalapati, U. K., Manzar, Md. A., N, T. V., A, R., B, P. S., J, R. S., Mirza, K. A., & S, P. K. (2021). Automated Detection of Depolarization and Repolarization of Cardiac Signal for Arrhythmia Classification. In *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)* (Vol. 17, Issue 02, pp. 173–181). International Association of Online Engineering (IAOE). <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.18955>
16. Aygun, A., Ghasemzadeh, H., & Jafari, R. (2020). Robust Interbeat Interval and Heart Rate Variability Estimation Method From Various Morphological Features Using Wearable Sensors. In *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* (Vol. 24, Issue 8, pp. 2238–2250). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/jbhi.2019.2962627>
17. Patra, G. R., Mohapatra, S. K., & Mohanty, M. N. (2022). Applications of deep learning algorithms in biomedical signal processing - pros and cons. In *International Journal of Biometrics* (Vol. 14, Issue 1, p. 98). Inderscience Publishers. <https://doi.org/10.1504/ijbm.2022.119560>
18. Kaur, P., & Dewan, L. (2021). LabVIEW-based cardiac risk assessment of foetal ECG signal extracted from maternal abdominal signal. In *International Journal of Computer Applications in Technology* (Vol. 66, Issue 2, p. 115). Inderscience Publishers. <https://doi.org/10.1504/ijcat.2021.119761>
19. Elouaham, S., Dliou, A., Jenkal, W., Louzazni, M., Zougagh, H., & Dlimi, S. (2024). Empirical Wavelet Transform Based ECG Signal Filtering Method. In A. Tani (Ed.), *Journal of Electrical and Computer Engineering* (Vol. 2024, pp. 1–13). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2024/9050909>
20. Baghel, N., Dutta, M. K., & Burget, R. (2020). Automatic diagnosis of multiple cardiac diseases from PCG signals using convolutional neural network. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (Vol. 197, p. 105750). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105750>
21. D'Aloia, M., Longo, A., & Rizzi, M. (2019). Noisy ECG Signal Analysis for Automatic Peak Detection. In *Information* (Vol. 10, Issue 2, p. 35). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/info10020035>
22. González-rodríguez, C., Alonso-arévalo, M. A., & García-canseco, E. (2023). Robust Denoising of Phonocardiogram Signals using Time-Frequency Analysis and U-Nets. In *IEEE Access* (pp. 1–1). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2023.3280453>
23. Lyu, X., Rani, S., Manimurugan, S., & Feng, Y. (2025). A Deep Neuro-Fuzzy Method for ECG Big Data Analysis via Exploring Multimodal Feature Fusion. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* (Vol. 33, Issue 1, pp. 444–456). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2024.3416217>
24. Sulthana, A., Rahman, Md. Z. U., & Mirza, S. S. (2018). An Efficient Kalman Noise Canceller for Cardiac Signal Analysis in Modern Telecardiology Systems. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 34616–34630). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2018.2848201>
25. Raj, S., Ray, K. C., & Shankar, O. (2016). Cardiac arrhythmia beat classification using DOST and PSO tuned SVM. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine* (Vol. 136, pp. 163–177). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.08.016>
26. Abdulla, L. A., & Al-Ani, M. S. (2020). A Review Study for Electrocardiogram Signal Classification. In *UHD Journal of Science and Technology* (Vol. 4, Issue 1, pp. 103–117). University of Human Development. <https://doi.org/10.21928/uhdjt.v4n1y2020.pp103-117>
27. Zubair, M., Kim, J., & Yoon, C. (2016). An Automated ECG Beat Classification System Using Convolutional Neural Networks. In *2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS)* (pp. 1–5). 2016 6th International Conference on IT Convergence and Security (ICITCS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icitcs.2016.7740310>
28. Yin, W., Yang, X., Zhang, L., & Oki, E. (2016). ECG Monitoring System Integrated with IR-UWB Radar Based on CNN. In *IEEE Access* (pp. 1–1). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2016.2608777>
29. Acharya, U. R., Oh, S. L., Hagiwara, Y., Tan, J. H., Adam, M., Gertych, A., & Tan, R. S. (2017). A deep convolutional neural network model to classify heartbeats. In *Computers in Biology and Medicine* (Vol. 89, pp. 389–396). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.08.022>
30. Zhai, X., & Tin, C. (2018). Automated ECG Classification Using Dual Heartbeat Coupling Based on Convolutional Neural Network. In *IEEE Access* (Vol. 6, pp. 27465–27472). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/access.2018.2833841>
31. Zhang, J., Tian, J., Cao, Y., Yang, Y., & Xu, X. (2020). Deep time–frequency representation and progressive decision fusion for ECG classification. In *Knowledge-Based Systems* (Vol. 190, p. 105402). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105402>
32. Wang, J. (2020). A deep learning approach for atrial fibrillation signals classification based on convolutional and modified Elman neural network. In *Future Generation Computer Systems* (Vol. 102, pp. 670–679). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.012>
33. Yao, Q., Wang, R., Fan, X., Liu, J., & Li, Y. (2020). Multi-class Arrhythmia detection from 12-lead varied-length ECG using Attention-based Time-Incremental Convolutional Neural Network. In *Information Fusion* (Vol. 53, pp. 174–182). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.06.024>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-13>

UDC 681.326.74

Віталій Дмитрович Назарук, к.т.н., старший викладач

<https://orcid.org/0000-0002-7579-9190>

Костянтин Сергійович Шайнюк, аспірант

<https://orcid.org/0009-0003-6523-940X>

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

МОДЕЛЬ ЗАГРОЗ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЇ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ MOODLE

Назарук В.Д., Шайнюк К.С. Модель загроз для інформації системи дистанційного навчання Moodle. В роботі розглянуто загрози інформаційної безпеки системи дистанційного навчання Moodle, як найбільш поширеної системи в закладах вищої освіти України. Описано основні категорії загроз, які можуть виникнути в ході впровадження та експлуатації зазначеної системи в навчальному процесі, деталізовано окремі аспекти і підготовлено детальний аналіз загроз за рахунок несанкціонованого фізичного доступ до технічних засобів оброблення та зберігання інформації, порушення встановлених правил управління і розмежування ролевим доступом, помилок та відмов (збоїв) у функціонуванні програмного забезпечення, впровадження комп'ютерних вірусів та закладних програм, неправильних навмисних або ненавмисних дій персоналу, а також надзвичайних ситуацій. Визначено та зведено в таблицю вплив зазначених загроз на основні безпекові характеристики інформації (конфіденційність, цілісність, доступність та спостережність). Задля запобігання інцидентів інформаційної безпеки в системі по кожному виду загроз розроблено та надано рекомендації щодо протидії існуючим загрозам. Розроблена модель загроз для інформації в системі дистанційного навчання Moodle може бути використана при підготовці технічного завдання для побудови комплексної системи захисту інформації (далі - КСЗІ) системи дистанційного навчання, або проведення аудиту інформаційної безпеки відповідно до положень міжнародних стандартів. В свою чергу, впровадження КСЗІ чи проведення аудиту відкриває можливість безпечно і надійно використовувати зазначену інформаційну систему в навчальному процесі закладів вищої освіти із дотриманням вимог чинного законодавства України.

Ключові слова: системи дистанційного навчання, загрози безпеки інформації, модель загроз, засоби та заходи захисту.

Nazaruk V., Shayniuk K. Threat model for the information security of the moodle distance learning system. This paper examines the information security threats faced by Moodle, the most widely used distance learning system in Ukrainian higher education institutions. The study outlines the primary categories of threats that may arise during the implementation and operational use of this system in academic settings. Key areas of analysis include unauthorized physical access to data processing and storage equipment, breaches in access control and role-based management policies, software errors and malfunctions, introduction of computer viruses and malware, as well as both intentional and unintentional actions by personnel, and emergency situations. Each threat's impact on critical security attributes – confidentiality, integrity, availability, and observability – is detailed and summarized in tabular form. To prevent information security incidents within the system, the authors offer targeted recommendations to counteract each identified threat. The developed threat model for Moodle-based distance learning systems can serve as a foundation for creating a comprehensive information security system (CISS) or conducting security audits in line with international standards. Implementing a CISS or conducting an audit enhances the security and reliability of this educational platform in academic environments, ensuring compliance with Ukrainian legislation.

Keywords: remote learning systems, information security threats, threat model, security measures and protection methods.

Вступ.

Системи дистанційного навчання стають в даний час невід'ємною частиною освітнього процесу закладів вищої освіти усіх рівнів. Зумовлено це передусім їх функціоналом, який надає можливості зосередження в одному місці необхідних матеріалів навчальних курсів, інструментів контролю отриманих знань та інтерактивного діалогу здобувачів освіти з науково-педагогічними працівниками. Особливо затребуваними системи дистанційного навчання стали в період карантинних обмежень та в умовах воєнного часу, проте і після завершення зазначених обмежень їх популярність буде зростати, враховуючи опції економії часу на пересування до навчального закладу здобувачів вищої освіти і викладацького складу, можливості виконання завдань у зручний час, наявності інструментів неупередженої оцінки знань у вигляді тестів.

Така трансформація освітнього процесу вимагає детального аналізу стану кібербезпеки та захисту інформації впроваджених у навчальних закладах систем дистанційного навчання та вироблення рекомендацій щодо локалізації можливих вразливостей та загроз.

Постановка завдання.

Захисту підлягають наступні групи інформації системи дистанційного навчання:

- дані та програмні коди у вигляді файлів різних форматів, записів баз даних та інших структур машинного представлення;
- бази даних захисту (списки зареєстрованих користувачів, їх ідентифікаторів, повноважень користувачів, права доступу, журнали реєстрації подій та ін.);
- дані загального користування (в тому числі, – навчальні матеріали, дані тестів та оцінювання знань).

Особлива увага з точки зору захисту має бути приділена даним оцінювання знань, які використовуються в різного роду рейтингуваннях, призначенні стипендій та документах про отримання вищої освіти і, згідно Закону України Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах [1], повинні оброблятися в системі із застосуванням комплексної системи захисту інформації, або при підтвердженні відповідності системи управління інформаційною безпекою за результатами процедури з оцінки відповідності національним стандартам України щодо систем управління інформаційною безпекою.

Під час створення комплексної системи захисту інформації необхідно визначити переліків відомостей, які підлягають захисту в процесі обробки, інших об'єктів захисту в АС, класифікувати інформацію за вимогами до її конфіденційності або важливості для організації, необхідних рівнів захищеності інформації, визначення порядку введення (виведення), використання та розпорядження інформацією в автоматизованій системі (далі – АС), а також розробити та коригувати періодично моделі загроз і моделі захисту інформації в АС.

Задля впровадження достатніх і ефективних засобів захисту необхідно систематизувати існуючі загрози. Результат такої систематизації викладається у вигляді моделі загроз, яка, в свою чергу, слугуватиме вихідними даними для розроблення та впровадження комплексу засобів і заходів захисту.

Огляд джерел

Правові, та організаційні засади функціонування системи вищої освіти в Україні встановлено Законом України Про вищу освіту [2], рекомендації щодо навчально-методичного та інформаційного забезпечення навчального процесу за дистанційною формою навчання визначені Положенням про дистанційне навчання [3], відносини у сфері захисту інформації в інформаційно-комунікаційних системах врегульовано Законом України Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах [1], правові та організаційні основи захисту життєво важливих інтересів суспільства та держави, національних інтересів України у кіберпросторі визначено Законом України Про основні засади забезпечення кібербезпеки України.[4].

В [5] надана оцінка загроз, викликів і можливостей запровадження дистанційного навчання внаслідок пандемії. Автори [6] звертають увагу на недосконалість політик безпеки існуючих систем дистанційного навчання. Як стверджено в [7], за результатами дослідження систем дистанційного навчання Sakai, Moodle, Atutor, ILIAS, Canvas, Blackboard, Webtutor на наявність механізмів захисту, найбільш захищеною є система Moodle (7 балів), а найменш захищеною – Webtutor (3 бали). Одночасно, система Moodle є і найбільш використовуваною в закладах вищої освіти України.

Рекомендації стосовно створення моделі загроз приведені в п.п. 4.2 – 4.3 додатку «Методичні вказівки щодо структури та змісту Плану захисту інформації в автоматизованій системі» до нормативного документу з технічного захисту інформації НД ТЗІ 1.4-001-2000 «Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі» [8]. Вимоги до захисту інформації WEB-сторінки від несанкціонованого доступу визначено в [9].

Згідно [10] із всієї множини способів класифікації загроз найпридатнішою для аналізу є класифікація загроз за результатом їх впливу на інформацію, тобто, в нашому випадку, порушення цілісності і доступності інформації.

Виклад основного матеріалу.

Однією із найбільш поширених в Україні систем дистанційного навчання є Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment — модульне об'єктно-орієнтоване динамічне навчальне середовище). Її популярність обумовлена такими факторами, як модульність, масштабованість і функціональність, а також наявністю відкритої (публічної) ліцензії GPL - General Public License. Разом з тим, така система потребує ретельного і зваженого підходу до виділення апаратного ресурсу, налаштування компонентів, впровадження заходів безпеки та адміністрування в цілому. Враховуючи важливість застосування системи в навчальному процесі

закладу вищої освіти, особливу увагу необхідно приділити загрозам інформаційній безпеці та впровадженню дієвих заходів та засобів захисту.

В свою чергу, впровадження засобів та заходів захисту проектується за відповідним технічним завданням, розробка якого виконується на підставі певних вихідних даних. Такі вихідні дані згідно [8], рекомендовано описати в *моделі загроз* та *моделі порушника* для кожної конкретної автоматизованої системи (АС). Предметом даного дослідження є модель загроз для інформації системи дистанційного навчання.

Модель загроз для інформації системи дистанційного навчання Moodle

Усі загрози та можливі кіберінциденти щодо інформації, яка створюється, обробляється та зберігається у зазначеній інформаційній системі, можна поділити на наступні категорії:

- несанкціонований фізичний доступ до серверного та мережевого обладнання;
- порушення встановлених правил розмежування та управління доступом;
- помилки у програмному забезпеченні (далі - ПЗ) та відмови (збої) у функціонуванні ПЗ та технічних засобів;
- впровадження шкідливого програмного забезпечення;
- неправильні та зловмисні дії користувачів;
- надзвичайні ситуації.

В таблиці 1 представлено перелік загроз інформації, де використовуються наступні скорочення для позначення тих характеристик інформації, на які впливає та або інша загроза: К - конфіденційність, Ц – цілісність, Д - доступність, С - спостережність. В стовпцях граfi «Наслідки» знаком «+» відмічається можливість виникнення зазначеної загрози.

Табл. 1 Перелік загроз інформації

з/п	Тип та визначення загроз	Джерело загроз	Наслідки			
Загрози несанкціонованого фізичного доступу до обладнання						
	Пошкодження, знищення або викрадення обладнання.	Людина	+			
	Несанкціоноване копіювання інформації.	Людина	+			
	Внесення несанкціонованих змін в ПЗ та бази даних.	Людина	+			
	Внесення несанкціонованих змін в конфігурацію мережевої інфраструктури.	Людина	+			
Порушенням встановлених правил розмежування та управління доступом						
	Підключення порушника до системи під ідентифікатором або паролем зареєстрованого користувача	Людина	+			
	Переповнення таблиці логування зареєстрованих користувачів	ПЗ, обладнання				
	Неспроможність обробки процедури аутентифікації через недостатню продуктивність ядра системи	Обладнання				

	Відсутність доступу за рахунок аварій та несправностей мережевого обладнання	Людина, обладнання				
	Відсутність доступу, спричинена Dos та DDos атаками	Людина, ПЗ, обладнання				
Помилки у ПЗ та відмови (збої) технічних засобів						
0	Збої, викликані використанням застарілих версій операційної системи, кластеру віртуалізації та ПЗ LMS Moodle	ПЗ				
1	Переповнення таблиць баз даних через обмежений ресурс пам'яті	ПЗ, обладнання				
2	Вихід з ладу обладнання, в т.ч через фізичний знос компонентів	Обладнання				
3	Відсутність електроживлення	Обладнання, середовище				
Впровадження шкідливого програмного забезпечення						
4	Ураження програмного забезпечення комп'ютерними вірусами	Людина, ПЗ				
5	Шифрування баз даних та ПЗ за допомогою шкідливого програмного забезпечення	Людина, ПЗ				
6	Перехоплення паролів програмою-імітатором, включення в програми програмних закладок типу «троянський кінь», «бомба» тощо	Людина, ПЗ				
7	Використання «вад» мов програмування, операційних систем, мережевої інфраструктури (у тому числі параметрів системи захисту, встановлених «за умовчанням»).	Людина, ПЗ				
Неправильні та зловмисні дії користувачів						
8	Випадкові помилки користувачів, обслуговуючого персоналу, помилкове конфігурування та адміністрування системи.	Людина				
9	Цілеспрямовані дії щодо неправомірного впливу на оброблювану інформацію та ПЗ	Людина				
0	Цілеспрямовані дії щодо зміни режимів роботи системи	Людина, ПЗ, обладнання.				
1	Викрадення в корисливих цілях інформації з ознаками інтелектуальної власності та екзаменаційних тестів користувачами з привілейованими правами доступу.	Людина				

Надзвичайні ситуації					
2	Аварія систем життєзабезпечення (електроживлення, охолодження та вентиляції, ліній зв'язку тощо)	Середовище			
3	Фізичне зруйнування системи (внаслідок вибуху, пожежі, затоплення тощо) пошкодження всіх або окремих найбільш важливих компонентів системи (пристроїв, носіїв важливої інформації).	Середовище			

Згідно наданих в [8] рекомендацій, протидіяти наведеним вище загрозам доцільно із використанням наступних засобів та заходів захисту.

Загрози несанкціонованого фізичного доступу до обладнання.

Несанкціонований фізичний доступ до технічних засобів може реалізовуватися шляхом проникнення порушника у приміщення, де такі засоби розташовано. У випадку реалізації цієї загрози створюються передумови для порушення цілісності, конфіденційності і доступності інформації.

Заходи та засоби протидії:

- визначення порядку фізичного доступу співробітників та відвідувачів у приміщення, де розташовано серверне та мережеве обладнання (шляхом затвердження переліку осіб, яким дозволено знаходитись у приміщенні);
- розробка та дотримання регламенту розкриття та опечатування приміщень, постановки та зняття їх з охоронної сигналізації;
- забезпечення охорони приміщення, де розташовано обладнання у неробочий час;
- регламентування порядку дій персоналу та охорони у випадку реалізації спроб несанкціонованого фізичного доступу.

Порушення встановлених правил розмежування та управління доступом

Несанкціонований доступ до інформації здійснюється з порушенням встановлених правил управління доступом, а саме підключення порушника до системи під ідентифікатором або паролем зареєстрованого користувача з подальшим використанням забороненого програмного забезпечення для отримання доступу до інформаційних ресурсів в обхід системи управління доступом. У випадку реалізації цієї загрози створюються передумови для порушення цілісності, конфіденційності і доступності інформації.

Заходи та засоби протидії:

- надання привілейованих прав доступу користувачам з необхідним рівнем знань, та належною репутацією;
- обмеження доступу, надання користувачам доступу тільки до необхідних ресурсів та функціоналу. Використання принципу найменших привілеїв (Least Privilege Principle).
- реєстрація дій користувачів у захищеному журналі аудиту;
- впровадження двофакторної аутентифікації усіх, без виключення користувачів системи;
- логування і сповіщення про вхід до системи користувачів з розширеними правами доступу, автоматизоване віддалене блокування засобами системи у разі сповіщення про несанкціонований вхід;

Відсутність доступу користувачів до системи може бути спричинена переповненням таблиці логування, або зовнішніми DoS/DDoS атаками. Згідно проведених в ході дослідження спостережень, активність надмірного доступу до системи фіксується у період заліково - екзаменаційних сесій. Така активність зумовлена як об'єктивними факторами необхідності доступу здобувачів вищої освіти до освітніх матеріалів, так і зловмисними діями з метою перешкоджання навчальному процесу.

Заходи та засоби протидії:

- виділення достатнього апаратного ресурсу для ведення таблиць логуювання та періодичне очищення їх адміністратором системи;
- аналіз трафіку на кількох рівнях інфраструктури: для першого рівня може бути використано мережеве обладнання (маршрутизатор), другий рівень - операційна система, третій рівень - додаткові налаштування прикладного програмного забезпечення або самої навчальної платформи та її модулів.
- фіксація IP-адрес пристроїв, які приймають або приймали участь в DoS/DDoS атаках та внесення їх в адрес-листи з обмеженим доступом або блокування їм окремих IP протоколів для запобігання надання відповіді на отримані від них запити;

Неправильні та зловмисні дії персоналу

Неправильні дії персоналу трапляються внаслідок його низької кваліфікації, недбалого ставлення до своїх службових обов'язків або свідомого завдання шкоди. У випадку реалізації цієї загрози створюються передумови для порушення цілісності, конфіденційності і доступності інформації.

Внаслідок таких дій персоналу можуть трапитись:

- відмови окремих компонентів, руйнування технічних засобів АС, програмних ресурсів (обладнання, каналів зв'язку, втрата даних, програм та ін.);
- ненавмисне пошкодження носіїв інформації;
- неправомірні зміна режимів роботи АС (окремих компонентів, обладнання, ПЗ тощо), ініціювання тестуючих або технологічних процесів, які здатні призвести до незворотних змін у системі (наприклад, форматування носіїв інформації або знищення окремих інформаційних ресурсів);
- ненавмисне зараження ПЗ комп'ютерними вірусами;
- неконтрольоване поширення інформації з АС, паролів та ідентифікаторів користувачів, іншої інформації щодо режимів роботи АС;
- неправомірне впровадження і використання стороннього ПЗ (наприклад, навчальних та ігрових програм, несанкціонованого системного і прикладного ПЗ та ін.).

Заходи та засоби протидії:

- організація професійної підготовки;
- розмежування прав доступу та привілеїв;
- впровадження політик та інструкцій безпеки;
- моделювання неправильних дій персоналу;
- ведення журналів аудиту дій користувачів у АС;
- регламентація порядку допуску користувачів до роботи з АС.

Зловмисні дії користувачів можуть бути спрямовані на несанкціоновану модифікацію результатів оцінювання знань (оцінки), викрадення інформації з ознаками інтелектуальної власності та викрадення інформації із вмістом підсумкових тестів з корисливими мотивами. В першу чергу це стосується користувачів з привілейованим доступом. Наприклад, користувач із роллю "менеджер кафедри" має технічну можливість відібрати курс, розроблений одним викладачем і закріпити за цим курсом іншого викладача без відома першого. Інша загроза може бути реалізована користувачами із роллю "модератор центру оцінювання знань", які мають доступ до всіх, без виключення, тестових завдань, розроблених викладачами з відміченими правильними відповідями на кожне питання. Саме ця категорія користувачів має технічну можливість копіювати зазначену інформацію і розпоряджатись нею на власний розсуд.

Заходи та засоби протидії:

- регламентування дій користувачів із привілейованим доступом, яке унеможливує певні зловживання;
- мінімізація кількості користувачів з привілейованим доступом;
- налаштування доступу до тестових завдань таким чином, щоб право на копіювання та модифікацію мав лише розробник цих завдань чи гарант освітньої програми.

Надзвичайні ситуації

Надзвичайні події (пожежа, затоплення, землетрус, військові дії, виникнення радіаційної та хімічної небезпеки) можуть бути причиною порушення конфіденційності, цілісності і доступності інформації.

Заходи та засоби протидії:

- проведення учбових занять з користувачами системи щодо їх дій на випадок виникнення надзвичайних ситуацій;
- організація системи оповіщення;
- впровадження технічних засобів протидії (мінімізації шкоди) від загрози, які включають протипожежне обладнання, систему оповіщення персоналу, резервного електропостачання;
- створення запасних комплектів технічних засобів, резервних копій ПЗ та інформаційних ресурсів системи дистанційного навчання;
- забезпечення резервних копій за принципом 3 – 2 – 1.

Висновки

Приведений в роботі аналіз загроз для інформації в системі дистанційного навчання Moodle може бути використаний при створенні технічного завдання для побудови комплексної системи захисту інформації, а також розробникам та адміністраторам, які працюють над супроводом та експлуатацією зазначеної системи.

Предметом подальших досліджень можуть стати модель порушника системи дистанційного навчання та розробка технічного завдання на побудову системи захисту.

Список бібліографічного опису

1. Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах [Електронний ресурс]. – Закон України № 31. – 1994. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Про вищу освіту: Закон України [Електронний ресурс]. – № 34. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>
3. Про затвердження Положення про дистанційне навчання [Електронний ресурс]. – Наказ МОН № 466. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13#Text>
4. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України [Електронний ресурс]. – Закон України № 45. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
5. Панасенко І. В. Дистанційне навчання в Україні: аналіз загроз і викликів. [Електронний ресурс]. – Бізнес Інформ. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.business-inform.net/main/>
6. Yong Chen, Wu He. Security Risks and Protection in Online Learning: A Survey. The International Review of Research in Open and Distance Learning. – IRRODL. – 2013. – №14. – С. 108–127.
7. Гарасимчук О. І. Організація захисту результатів контролю знань в системах дистанційного навчання. Кібербезпека: освіта, наука, техніка // Київський університет імені Бориса Грінченка. – 2020. – № 2(10). – С. 122–157.
8. Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі. НД ТЗІ 1.4-001-2000
9. Вимоги до захисту інформації WEB-сторінки від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 2.5-010-03
10. Загальні положення щодо захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. НД ТЗІ 1.1-002-99

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2014). On Higher Education: Law of Ukraine No. 34 [Electronic resource]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>
2. Ministry of Education and Science of Ukraine. (2013). On the Approval of the Regulation on Distance Learning: Order No. 466 [Electronic resource]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13#Text>
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (1994). On the Protection of Information in Information and Communication Systems: Law of Ukraine No. 31 [Electronic resource]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80#Text>
4. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine: Law of Ukraine No. 45 [Electronic resource]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
5. Panasenko, I. V. (2021). Distance Learning in Ukraine: Analysis of Threats and Challenges [Electronic resource]. Business Inform. Retrieved from <https://www.business-inform.net/main/>
6. Chen, Y., & He, W. (2013). Security Risks and Protection in Online Learning: A Survey. The International Review of Research in Open and Distance Learning, 14, 108–127.
7. Harasymchuk, O. I. (2020). Organization of Protection of Knowledge Assessment Results in Distance Learning Systems. Cybersecurity: Education, Science, Technology, 2(10), 122–157. Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv University.
8. Standard Regulation on the Information Protection Service in an Automated System. ND TZI 1.4-001-2000.
9. Requirements for Information Protection of Web Pages from Unauthorized Access. ND TZI 2.5-010-03.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-14>

UDC 004.8:004.42

Polyakovska Nataliya, Master, Data Scientist

<https://orcid.org/0000-0003-2855-7970>

SoftServe, Lviv, Ukraine

TOWARDS A PRACTICAL FRAMEWORK FOR LLMOPS: UNDERSTANDING AND BUILDING OPERATIONAL EXCELLENCE FOR LARGE LANGUAGE MODELS

Polyakovska N. Towards a Practical Framework for LLMops: Understanding and Building Operational Excellence for Large Language Models. Effective life cycle management of large language models (LLMs) ensures their reliability and adaptability in production environments. The study's relevance is due to the rapid growth in the use of large language models in various industries, accompanied by challenges such as high computational requirements, risks of generating false results ("hallucinations"), and algorithmic bias. It is established that traditional MLOps methods do not provide adequate quality control and scalability, which requires the development of specialized operational approaches for LLM. The study aims to form an operational framework for LLMops that covers all stages of the life cycle of large language models, from data processing to real-time monitoring and support. The research methods are based on an interdisciplinary analysis of current practices of implementing large-scale language models, identifying problematic aspects of their use, and developing practical recommendations for effective system management. The main stages of the operational framework are identified, including data preparation, model development and deployment, and control of results at the monitoring and support stages. The most critical aspects are integrating multi-level monitoring, compliance with ethical standards, and introducing automated algorithms to reduce the frequency of false positives. The study's results confirm that the proposed operational framework increases the reliability of language models in high-load environments and ensures their adaptation to dynamic changes in the query structure. The use of distributed computing methods, resource optimization, and post-processing verification helps minimize the risks associated with the performance and accuracy of model responses. Simulation stress tests are recommended to check the system's stability during peak load periods. Conclusions. The paper emphasizes the importance of continuously auditing models' operations to ensure their transparency and compliance with regulatory requirements. Prospects for further research include optimizing retraining processes and implementing energy-efficient computing resource management methods.

Keywords: LLMops, large language models, MLOps, operational framework, ethical artificial intelligence, generative AI life cycle, inference optimization.

Поляковська Н.О. На шляху до практичної рамки LLMops: розуміння та формування операційної досконалості для великих мовних моделей. Ефективне управління життєвим циклом великих мовних моделей (LLM) є ключовим аспектом забезпечення їхньої надійності та адаптивності у виробничих середовищах. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням використання великих мовних моделей у різних галузях, що супроводжується викликами, такими як високі обчислювальні потреби, ризики генерації хибних результатів («галюцинацій») та алгоритмічна упередженість. Встановлено, що традиційні методи MLOps не забезпечують належного рівня контролю якості та масштабованості, що вимагає розробки спеціалізованих операційних підходів для LLM. Мета дослідження – формування операційної рамки LLMops, яка охоплює всі етапи життєвого циклу великих мовних моделей: від обробки даних до моніторингу та підтримки в реальному часі. Методи дослідження базуються на міждисциплінарному аналізі сучасних практик упровадження великих мовних моделей, виявленні проблемних аспектів їхнього використання та розробці практичних рекомендацій для ефективного управління системами. Визначено основні етапи операційної рамки, зокрема підготовку даних, розробку та розгортання моделі, а також контроль результатів на етапах моніторингу й підтримки. Найбільш критичними аспектами є інтеграція багаторівневого моніторингу, дотримання етичних стандартів і впровадження автоматизованих алгоритмів для зменшення частоти помилок відповіді. Результати дослідження підтверджують, що запропонована операційна рамка підвищує надійність роботи мовних моделей у високонавантажених середовищах і забезпечує їхню адаптацію до динамічних змін у структурі запитів. Використання методів розподілених обчислень, оптимізації ресурсів і перевірки результатів на етапі постобробки сприяє мінімізації ризиків, пов'язаних із продуктивністю та точністю відповідей моделі. Рекомендовано впроваджувати симуляційні стрес-тести для перевірки стійкості системи під час пікових періодів навантаження. Висновки. У роботі наголошено на важливості постійного аудиту роботи моделей для забезпечення їхньої прозорості та відповідності нормативним вимогам. Перспективи подальших досліджень стосуються оптимізації процесів повторного навчання й упровадження методів енергоефективного управління обчислювальними ресурсами.

Ключові слова: LLMops, великі мовні моделі, MLOps, операційні рамки, етичний штучний інтелект, життєвий цикл генеративного ШІ, оптимізація інференції.

Problem statement. The problem of practical implementation and operation of large language models lies in the complexity of managing their life cycle, which includes development, deployment, monitoring, and support in real time. High computational requirements, high dependence on high-quality data, and sensitivity to changes in the operating environment characterize these models. Traditional MLOps practices do not fully meet the specific needs of working with large language models, as such systems require specialized approaches to assess the relevance of results to user requests, prevent model "hallucinations," and ensure ethical compliance. At the same time, using large language models in critical

areas such as medicine, education, and finance requires the development of a comprehensive operational framework that covers both technical and ethical aspects.

The scientific significance lies in the creation of an interdisciplinary approach that combines knowledge from the fields of distributed computing, machine learning, large language models and cybersecurity. The practical value of such a framework lies in the possibility of scalable and controlled application of language models to process large amounts of information while minimizing the risks associated with data privacy violations or algorithmic bias. Developing a practical LLM Ops framework will ensure the effective integration of models into production environments and promote the implementation of ethical standards of artificial intelligence in real-world use cases.

Analysis of the latest research and publications. The operational management of large language models (LLM) covers key aspects such as model lifecycle optimization, scalability, quality control, and ethical challenges associated with generative algorithms.

The development of large language models began with the creation of innovative architectures and training methods. In particular, A. Vaswani et al. proposed a transformer architecture that replaced recurrent and convolutional neural networks, providing high performance and parallelism of computation. This solution significantly increased the speed of processing long text sequences and laid the foundation for modern LLMs [1].

The next significant step was the study by J. Kaplan et al., who established the dependence of model performance on the number of parameters and the amount of training data. The conclusions of this work allowed developers to create large-scale models such as GPT, which demonstrate high efficiency in generative tasks [2].

A study by T.B. Brown et al. revealed the potential of few-shot learning, which allows models to achieve high performance with only a few instruction examples. This opens up opportunities for effective adaptation of models without the need for complete retraining [3].

In turn, L. Ouyang demonstrated the benefits of a reinforcement learning approach based on human feedback, which provides more accurate and relevant answers. This approach allows models to better respond to real user requests and reduce the number of false answers [4].

The information security challenges in large-scale systems are highly relevant, especially with the rise of large language models (LLMs). A study by Yifan Yao et al. emphasized LLMs' dual role in enhancing security, including code vulnerability detection, while also posing risks like user-level attacks and information leakage. Proper security measures and further research are essential to address these vulnerabilities [5].

Regarding adapting LLM to specific tasks, E.J. Hu proposed the LoRA (Low-Rank Adaptation) method, which allows for effective fine-tuning of models with minimal computational costs. This technique greatly facilitates the integration of models into workflows without the need for complete retraining [6].

M. Howard and G. Quattrocchi emphasized the importance of infrastructure automation to support scalable systems. They explored the benefits of using the Infrastructure-as-Code approach, which simplifies the management and deployment of large computing systems [7].

F. Zeng's research was devoted to distributed model training. He proposed optimizing data exchange between cluster nodes to reduce delays and improve system performance when training large models [8].

E. Frantar made a significant contribution to inference optimization by introducing the GPTQ method for quantized model training. This method can significantly reduce the amount of memory while maintaining high-generation quality [9].

M. Chen's work was devoted to speeding up inference through the use of optimized computing units. The proposed approach reduces the query execution time in production environments [10].

Evaluation plays a critical role in the quality control of language models. Y.-T. Lin and Y.-N. Chen has developed the LLM-Eval metric, which provides a multidimensional assessment of answers' coherence and actual accuracy. This study demonstrated the need to move from the traditional BLEU and ROUGE metrics to more comprehensive metrics for generative models [11].

The study by K. Kenthapadi analyzed real-time model monitoring systems that allow for quick detection of anomalies in LLM performance. The author emphasized the importance of adaptive monitoring systems to reduce the risk of decreased performance and response quality [12].

In the context of ethical challenges, L. Weidinger et al. have investigated the social risks associated with algorithmic bias and misinformation that models can generate. The authors emphasize the importance of developing ethical standards to prevent the harmful effects of LLM [13].

C. Borchers considered the problem of bias and “hallucinations,” proposing methods of adaptive fine-tuning and correction of hints to reduce false generations. These approaches minimize the risk of false answers and increase system user confidence [14].

T. Rebedea developed practical solutions for the security of LLM applications. He introduced the concept of “guardrails”—limiters that control the output content of models. His research shows that software guardrails significantly reduce the risks of malicious generation and increase the level of security [15].

H. Inan described the integration of security modules into systems of user interaction with models. The authors emphasized the importance of such modules to ensure transparency and minimize the risk of false answers in critical scenarios [16].

The research analysis shows that significant progress in the fields of LLM and MLOps has created the prerequisites for the formation of a separate LLMOps field that combines distributed learning, adaptive tuning, and automated monitoring approaches. The main areas of research include the development of model architectures, computational optimization, response quality assurance, and minimization of bias and “hallucinations.”

Highlighting previously unsolved parts of the problem. Despite the development of MLOps, large language models (LLMs) have specific needs that remain insufficiently explored. In particular, this concerns processing large amounts of unstructured data, optimizing distributed computing, and ensuring speed without losing quality. Monitoring systems without high computational costs have not been developed to detect delays and "hallucinations" in real time.

There are also unresolved issues of eliminating algorithmic bias and integrating automatic adjustments depending on the specifics of queries. Existing solutions are often focused on technical indicators but do not consider users' needs in different industries.

The proposed operating model covers all stages of the model lifecycle, including multi-level monitoring, automatic anomaly resolution, and ethical compliance. Practical recommendations for industry scenarios increase the reliability and scalability of LLMs, facilitating their effective integration into production environments.

The study aims to create a holistic LLMOps framework for effective life cycle management of large language models that considers performance, ethics, and compliance with production requirements.

Objectives of the study:

1. Analyze current approaches to MLOps and identify specific requirements for working with large language models, focusing on data processing, distributed computing, and building an operational model that covers all life cycle stages - from data preparation to supporting the model's functioning in real time.
2. Investigate methods for monitoring models in production environments focusing on detecting delays, accurate model outputs, and ethical compliance, and develop approaches to address critical risks of LLMs, such as bias and hallucinations, by integrating quality control and performance optimization mechanisms.
3. Provide practical recommendations for implementing the LLMOps framework in real-world use cases to ensure models' reliability, scalability, and adaptability in highly loaded environments.

Summary of the primary material. In modern research and practice, MLOps is considered a comprehensive approach to automating machine learning models' development, deployment, and operation. However, this approach is insufficient for large-scale language models (LLMs), as they have unique needs and challenges. One of the main differences is the scale of data processing and the need for distributed computing. Large language models operate on vast amounts of textual data that must be thoroughly cleaned, anonymized, and structured. In addition, LLM fine-tuning and inference processes require significant computational resources, making them unsuitable for standard MLOps approaches without high-performance clusters and specialized hardware. Accordingly, data processing and infrastructure management become critical steps in working with LLM (Table 1).

Table 1 – Comparison of traditional MLOps and specific requirements for LLMOps in the context of data processing and computing resources

Aspect	Traditional MLOps	Requirements for LLMOps
Data processing	Use of structured data sets with basic cleaning and normalization methods	Working with large volumes of unstructured data that requires anonymization, synthetic additions and classification
Data storage	Conventional relational databases or standard file systems	Use vector databases for quick access and search of relevant text fragments

Computing resources	Standard processors (CPUs) for most stages of training and inference	The need for graphics processing units (GPUs) and cluster computing to speed up training and reduce latency
Data volumes	Limited by the number of parameters and the number of datasets	Terabytes of text data to customize models and process user requests
Scalability	Local computing or small clusters	Scalable infrastructure to support distributed learning and inferences
Tools	Use of standard libraries and platforms such as TensorFlow, MLflow	Using specialized frameworks for LLM optimization, such as Hugging Face Transformers

Source: compiled by the author based on [1; 2; 8; 9].

Table 1 illustrates the key differences between traditional MLOps and LLMOps requirements. For large language models, data processing requires working with large amounts of text, often including anonymization and synthetic augmentation. Vector databases are used for data storage and faster access to information. It is also critical to have a high-performance infrastructure to ensure efficient data processing and support for parallel computing.

The life cycle of large language models (LLMs) covers all stages - from data preparation to real-time model maintenance and updating. The peculiarity of the LLM life cycle is its iterative nature and constant dependence on environmental changes. Creating an operational model involves considering such aspects as processing large volumes of unstructured data, efficient deployment and customization of models, and regular monitoring and support to ensure that models are adapted to new requests and conditions. Integrating such approaches avoids performance degradation and improves the accuracy of model responses while minimizing the risk of bias or "hallucinations." The main stages of the LLM lifecycle can be represented in the form of an operational model that considers the key tasks at each stage (Fig. 1 or Table 2, as appropriate).

Table 2 – Main stages of the life cycle of large language models and their key tasks

Life cycle stage	Process content	Key tasks
Data processing	Data collection, cleaning and anonymization using structuring algorithms and synthetic augmentation methods	Formation and maintenance of an up-to-date dataset that meets the requirements of confidentiality and relevance
Model development	Fine-tune models or use prompt engineering to adapt to specific tasks	Optimize model parameters, evaluate performance using specialized metrics, and prepare for deployment
Deployment	Integrate the model into the production environment with a scalable infrastructure	Containerize the model, ensure uninterrupted operation, and develop scaling strategies
Monitoring	Continuous data collection on model performance, analysis of performance metrics and response quality	Detect anomalies, monitor compliance with ethical standards, evaluate latency and throughput
Support and updates	Adaptation of the model to new working conditions, integration of feedback and re-training	Re-fine-tuning or updating the parameters of the prompts, integrating new data to improve accuracy and reliability

Source: compiled by the author based on [4; 5; 6; 7; 11].

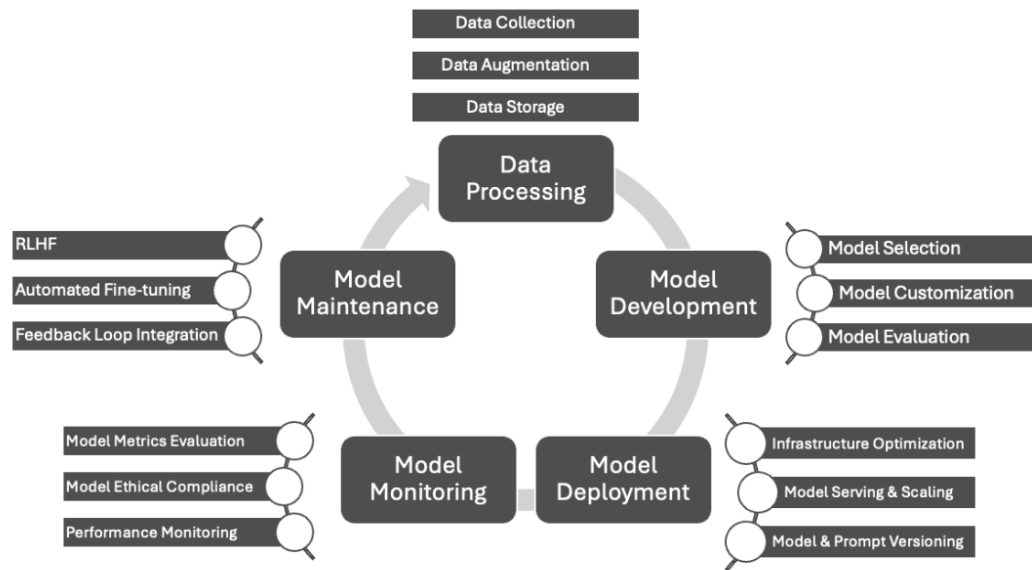


Figure 1. Main stages and components of the proposed LLM Ops framework
 Source: authors' own development

The proposed operational model for managing the life cycle of large language models (LLMs) consists of several interrelated stages that form a closed cycle. Such a cyclic structure ensures iterative processes and continuous improvement of the models in the production environment.

At the data processing stage, a comprehensive data collection, cleaning, and anonymization process is carried out to form a high-quality training dataset. Particular attention is paid to structuring unstructured data and applying synthetic augmentation methods to increase the volume and relevance of data without risking loss of model accuracy.

Model development involves adapting the LLM to specific tasks through fine-tuning or prompt engineering. This stage involves using optimization techniques such as LoRA or PEFT to reduce computational costs and improve efficiency. The quality of the model is evaluated using specialized metrics such as perplexity, answer consistency and query processing speed.

The model is deployed through containerization and integration into the production environment, considering the needs of scaling and ensuring stability even under high loads. At this stage, ensuring low latency and continuity of request service is important.

Monitoring the performance and quality of the model is critical for the timely detection of anomalies, including model “hallucinations” or biased results. For this purpose, modern metrics collection systems and automated systems for notifying about critical deviations are used. If degradation of results is detected, re-training or updating of hints can be initiated.

The model maintenance and updating phase involves implementing feedback and using new data to adapt the model to changing environmental conditions. This may include model re-fitting or integration of new approaches to data processing and parameter optimization. This ensures that model responses remain relevant and accurate even in dynamic use cases. Thus, the proposed LLM Ops framework demonstrates not only the structured management of the model's life cycle but also scientifically substantiates the feasibility of a cyclical organization to ensure sustainability, reliability, and compliance with ethical standards. Monitoring large language models (LLMs) in production environments is key to ensuring their stability, performance, and compliance with ethical standards. Given the scale and complexity of such models, monitoring goes beyond standard metrics such as accuracy and performance. It includes an assessment of response latency, error rate, response coherence, and detection of “hallucinations.” Particular attention is paid to compliance with ethical principles, as LLMs can show biased responses or generate inaccurate information, potentially creating user risks. Effective model monitoring requires the integration of automatic notification and feedback analysis systems, which allows for tracking critical deviations and initiating corrective measures in real-time (Table 3).

Table 3 – Key metrics for monitoring large language models in production environments

Monitoring metrics	Content of the indicator	Importance for model management
--------------------	--------------------------	---------------------------------

Latency of response	Time from receiving a request to receiving a response from the model	Allows you to assess whether the model meets performance requirements and how efficiently the infrastructure is used
Consistency of the answer	The level of logical integrity and meaningful sequence of answers	Helps determine whether the model generates clear and correct texts without contradictions
User feedback	User-provided ratings, reactions or qualitative feedback on whether the response was accurate, useful, or met their expectations.	Helps evaluate the model's performance from the user's perspective, measure satisfaction, and identify areas for improvement in accuracy, relevance, and usability.
Percentage of "hallucinations"	Share of responses containing false or fictitious information	Determines the need for additional training stages to increase the reliability of answers
Compliance with ethical standards	Presence of prejudice or discriminatory statements in the answers	Helps ensure that the model meets ethical standards and regulatory requirements

Source: compiled by the author based on [11; 13; 14; 15; 16].

LLM models in production environments are monitored in real time using automated metrics collection and analysis systems. For example, to assess response latency, tools monitor the speed of request processing and notify you when the acceptable limits are exceeded. High latency may indicate an overload of computing resources or the need to use additional GPU clusters. The consistency of the answer is checked both by automatic algorithms and with the involvement of a human to assess the context and content of answers in complex queries.

The rate of "hallucinations" is critical to maintaining user confidence in the system. If the model regularly generates false or fictitious answers, re-tuning or updating the prompt engineering is triggered to reduce the error rate. Ethical compliance is monitored by analyzing the content of answers for discriminatory statements or biases. To prevent violations, mechanisms for automatically blocking certain answers and regular audits by artificial intelligence experts are implemented.

Eliminating critical risks associated with the operation of large-scale language models (LLMs), such as bias and the generation of false information ("hallucinations"), is a priority to ensure their reliability and compliance with ethical standards [13]. One of the key risks is model bias, which arises from imbalances in the training data or insufficient control over the generation of responses [5]. This factor can affect both the content of the answers and their context, which poses a potential threat of incorrect information, especially in sensitive industries such as medicine, education, and law enforcement. Another significant risk is model "hallucinations" – cases where the model generates confident but false or fictitious statements that are not based on factual data [4].

To minimize such risks, it is important to implement comprehensive quality control mechanisms and optimize model performance. The selection and cleaning of training data help reduce the number of potentially biased or unreliable fragments that affect model performance. When preparing datasets, classification, and sample balancing methods are used to ensure that different points of view are represented and that certain categories of data are not dominated. In addition, one of the most effective methods is the introduction of special filters at the stage of post-processing the results, which allows the model's responses to be checked for compliance with ethical standards and the absence of potentially dangerous statements [15].

An important component is monitoring and automatic intervention systems allowing for real-time deviation detection. In particular, models can be configured to interrupt or block responses beyond the defined ethical framework or show signs of "hallucination." Using metrics, such as consistency of answers and checking for inconsistent statements, allows for maintaining high accuracy and logical integrity of the generated texts [11]. In addition, integrating models with verified knowledge databases helps narrow the generation space to factually correct data, reducing the likelihood of false statements. In practice, these approaches can be implemented as automated response evaluation modules that apply several verification algorithms to analyze the relevance of model results to current queries and their validity [12]. Such modules can operate in real time, creating multi-level protection against the impact of inaccurate data or bias risks. An additional element of control is a regular audit of model results by experts who analyze cases of false answers and adjust settings to maintain maximum transparency of the process. Implementing these methods and tools can significantly reduce critical risks and ensure the sustainability of models in various use cases.

Implementing the LLMops framework in real-world scenarios should consider the need to adapt to a dynamic environment and the specifics of application tasks in various industries. One of the key aspects is to create a scalable implementation strategy with the gradual connection of additional modules and stages of verification of the system's compliance with the practical needs of users. This involves integrating the system at a pilot level to test workloads and identify potential problems before launching at full capacity. In real-world production environments, implementing the framework also involves introducing a system for regularly collecting feedback from end users to update models in response to specific requests. An important component is simulation testing, which allows the system to be tested under stressful conditions to ensure its uninterrupted operation during peak loads. This approach avoids errors in critical situations and increases the system's reliability. Thus, the implementation of the LLMops framework becomes an effective solution for creating systems with a high level of adaptability and scalability. Integrating pilot testing, personalization, and simulation tests makes it possible to achieve stable operation of language models in real production environments while minimizing risks.

Conclusions and Prospects for Further Research. The article establishes that effective life cycle management of large language models (LLMs) requires specialized approaches for data processing, model tuning, monitoring, and adaptation to environmental changes. The main problems in this context are high computational resource requirements, the risk of "hallucinations," and algorithmic bias, which can reduce the accuracy and credibility of the results. The analysis of practical scenarios confirmed the need to implement multi-level monitoring and quality control systems that ensure timely detection of errors and support the stable operation of models.

The main recommendations are to use distributed computing technologies to scale systems, integrate mechanisms for automated response correction, and comply with ethical standards through regular audits and inspections. The proposed LLMops operating framework increases the reliability of models, ensures their adaptability to dynamic conditions, and minimizes the risks of bias by integrating sources of verified knowledge. Prospects for further research are related to the optimization of relearning processes and the implementation of efficient energy consumption methods in scalable computing systems. It is also advisable to develop tools for assessing models' coherence and ethical compliance in different linguistic and cultural contexts, which will contribute to the formation of universal practices to maintain transparency and accountability of language models on a global scale.

References:

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Curran Associates Inc.* 2017. P. 6000-6010. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html> (date of access: 02.01.2025).
2. Kaplan J., McCandlish S., Henighan T., Brown T. Scaling Laws for Neural Language Models. *ArXiv preprint. arXiv:2001.08361*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2001.08361> (date of access: 02.01.2025).
3. Brown T.B., Mann B., Ryder N., Subbiah M., Kaplan J., Dhariwal P., Neelakantan A. et al. Language Models Are Few-Shot Learners. *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems, Curran Associates Inc.* 2020. P. 1877-1901. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2020/hash/1457c0d6bfc4967418bfb8ac142f64a-Abstract.html> (date of access: 02.01.2025).
4. Ouyang L., Wu J., Jiang X., Almeida D., Wainwright C., Mishkin P., Zhang C. et al. Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback. *Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems, Curran Associates Inc.* 2024. P. 27730-27744. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/hash/b1efde53be364a73914f58805a001731-Abstract-Conference.html (date of access: 02.01.2025).
5. A survey on Large Language Model (LLM) security and privacy: The Good, The Bad, and The Ugly / Y. Yao et al. *High-Confidence Computing*. 2024. P. 100211. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hcc.2024.100211> (date of access: 16.01.2025).
6. Hu E.J., Shen D., Wallis P., Allen-Zhu Z., Li Y., Wang L., Chen W. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. *OpenReview.net: Website*. 2021. URL: <https://openreview.net/forum?id=nZeVKeeFYf9> (date of access: 02.01.2025).
7. Howard M. Terraform - Automating Infrastructure as a Service. *ArXiv preprint. arXiv:2205.10676*. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.10676> (date of access: 02.01.2025).
8. Zeng F., Zhao Y., Zhou X., Luo L. Distributed Training of Large Language Models. 29th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). *IEEE Xplore*. 2023. P. 840-847. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPADS60453.2023.00126> (date of access: 02.01.2025).

9. Frantar E., Stock P., LeCun Y. GPTQ: Accurate Post-Training Quantization for Generative Pre-Trained Transformers. *ArXiv preprint*. arXiv:2210.17323. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.17323> (date of access: 02.01.2025).
10. Zaharia M., Chen M., Ghodsi A., Jordan M. Accelerating the Machine Learning Lifecycle with MLflow. *IEEE Data Eng. Bull.* 2023. 1. P. 39-45. URL: <https://people.eecs.berkeley.edu/~alig/papers/mlflow.pdf> (date of access: 02.01.2025).
11. Lin Y.-T., Chen Y.-N. LLM-Eval: Unified Multi-Dimensional Automatic Evaluation for Open-Domain Conversations. *ArXiv preprint*. arXiv:2305.13711. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13711> (date of access: 02.01.2025).
12. Model Monitoring in Practice / K. Kenthapadi et al. *KDD '22: The 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Washington DC USA. New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3534678.3542617> (date of access: 15.01.2025).
13. Weidinger L., Uesato J., Biegler F., van den Driessche G., O'Brien C., Kramár J., McAleese N. Ethical and Social Risks of Harm from Language Models. *ArXiv preprint*. arXiv:2112.04359. 2021. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.04359> (date of access: 02.01.2025).
14. Looking for a Handsome Carpenter! Debiasing GPT-3 Job Advertisements / C. Borchers et al. *Proceedings of the 4th Workshop on Gender Bias in Natural Language Processing (GeBNLP)*, Seattle, Washington. Stroudsburg, PA, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2022.gebnlp-1.22> (date of access: 15.01.2025).
15. Rebedea T., Berengueres J., Dinic C., Safeguard L. NeMo Guardrails: A Toolkit for Controllable and Safe LLM Applications with Programmable Rails. *Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*. Association for Computational Linguistics. 2023. P. 431-445. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-demo.40> (date of access: 02.01.2025).
16. Inan H., Olmez G., Kaya M. Llama Guard: LLM-Based Input-Output Safeguard for Human-AI Conversations. *ArXiv preprint*. arXiv:2312.06674. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.06674> (date of access: 02.01.2025).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-15>

УДК 004.89

Проніна Ольга Ігорівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-7085-8027>

Синицін Руслан Валерійович, студент

<https://orcid.org/0009-0007-1825-1587>

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, Україна

РОЗРОБКА AI АСИСТЕНТА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО КОРИСТУВАЧА НА МОВІ ПРОГРАМУВАННЯ PYTHON

Проніна О.І., Синицін Р.В. Розробка AI асистента для локального користувача на мові програмування Python. У статті розглядається система розробки багатофункціонального AI-асистента, який здатний виконувати широкий спектр завдань. Представлено модель AI-асистента, розроблену на основі нейронних мереж, яка забезпечує високу точність у виконанні команд та здатна працювати в реальному часі. Запропонована модель досягла високої точності в розпізнаванні голосу, ефективно працюючи навіть коли використовується без підключення до інтернету. В моделі є інтеграція системи розпізнавання мови Vosk та Speech Recognition вони дозволяють точно й ефективно обробляти голосові команди. Виконується розпізнавання голосових команд у режимі реального часу, незалежно від того, чи йдеться про прості команди для окремих дій, чи про сценарії, які включають отримання інформації. Також реалізовано обробка текстового введення для виконання команд. Особлива увага в роботі приділялась розробці ефективної математичної моделі, яка мінімізує затримки у виконанні запитів і забезпечує стабільну роботу.

Ключові слова: AI-асистент, нейронні мережі, Vosk, Speech Recognition, голосові команди, локальна обробка.

Pronina O., Synytsin R. Development of AI assistant for local user in Python programming language. The article considers a system for developing a multifunctional AI assistant capable of performing a wide range of tasks. An AI assistant model developed based on neural networks is presented, which provides high accuracy in executing commands and is capable of working in real time. The proposed model has achieved high accuracy in voice recognition, working effectively even when used without an Internet connection. The model integrates the Vosk and Speech Recognition speech recognition systems, which allow for accurate and efficient processing of voice commands. Voice commands are recognized in real time, regardless of whether they are simple commands for individual actions or scenarios that include obtaining information. Text input processing for executing commands is also implemented. Particular attention in the work was paid to the development of an effective mathematical model that minimizes delays in executing requests and ensures stable operation.

Keywords: AI assistant, neural networks, Vosk, Speech Recognition, voice commands, local processing.

Постановка наукової проблеми. В сучасному світі інформаційних технологій штучний інтелект є трендовим напрямком розробки. Сучасні моделі штучного інтелекту дозволяють виконувати безліч цікавих завдань. Одним з напрямків використання штучного інтелекту є спілкування з чатами та помічниками на природній мові – текстом чи голосом. Однією з важливих проблем при розробці AI-асистента є забезпечення високої точності та ефективності обробки саме голосових команд. Vosk [1] є найбільш ефективний інструмент для локального розпізнавання мови, який забезпечує точність навіть в умовах не підключеного інтернету. Speech Recognition [2] дозволяє швидко обробляти великий обсяг запитів, але вимагає підключення до інтернету. Після розпізнавання голосу надсилається запит до ChatGPT [3]. Завдяки можливості обробляти запити та генерувати відповіді на різні запитання, дозволяє надавати корисну інформацію в реальному часі. Згенеровано відповідь надсилається до інтерфейсу PyQt6 [4] де текст виводиться на екран за допомогою QTextEdit [5]. Також є важливою складовою для побудови AI-асистента модель, яка підтримує синтез голосу Silero Models що дозволяє створювати двосторонні взаємодії між користувачем.

Завдяки PyQt6 можна комбінувати технології в інтерфейсі, що допомагає ефективно обробляти голосові команди, інтегрувати різні функціональні можливості та надавати користувачам точну та швидку відповідь. PyQt6 допомагає зробити інтерфейс більш чуйним та зручним у використанні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наукова галузь розробки AI-асистентів є достатньо популярною, існує ряд робіт, деякі з яких розглянути в роботі. В роботі [6] розглядається питання чат-ботів, що є ідеальною демонстрацією того, як прості завдання та запити, такі як підтримка клієнтів або показники продажів і звітність, можна вирішити без втручання людини. В роботі представлено орієнтовану на завдання структуру чат-бота для іспанської мови на веб-сторінці точки продажу. Автори застосували методи обробки природної мови (NLP) і оцінили два методи навчання під наглядом. Для реалізації цієї діалогової системи в подальших роботах була

запропонована архітектура програмного забезпечення, що використовує обчислювальний сервіс PaaS і структуру API.

У роботі [7] розглядається пошук найліпшого варіанту для впровадження штучної нейронної мережі в інформаційній системі для технічних інструкцій студентської дипломної роботи. Автори обрали для машинного навчання послідовну модель, це означає, що ANN використовує лише 1 вхідний шар, прихований/щільний шар і 1 вихідний шар. У процесі підготовки даних застосовано метод стохастичного градієнта (SGD). Результатами цього дослідження є додатки чат-ботів і тестування моделі з використанням матриці плутанини. Робота [8] присвячена використанню генеративних помічників ШІ (GAI) для розробки програмного забезпечення. Хоча ШІ вже використовується в різних сферах розробки програмного забезпечення, технології GAI, такі як GitHub Copilot і ChatGPT.

У статті [9] автори провели масштабне дослідження, спрямоване на те, як використовуються помічники ШІ, зосереджуючись на конкретних діях і етапах розробки програмного забезпечення. Було виявлено, що використання помічників ШІ залежить від активності та стадії та активно впроваджується.

Робота [10] присвячена моделюванню нового покоління віртуальних персональних помічників як інтегрованого голосового помічника в ОС Windows. Автори в своїй роботі підтверджують, що навчання з підкріпленням може вивчати попередньо визначену модель віртуального помічника за допомогою визначеного користувачем набору даних.

Мета дослідження. Метою роботи є створення AI-асистента, який буде здатний ефективно працювати в реальному часі, виконуючи запити користувача через голосове або текстове введення.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. У цієї роботі було побудовано власного AI-асистента. Користувач надсилає запит, який спочатку обробляється системою для визначення його цілі, далі запит або надсилається до ChatGPT, або виконується на локальному комп'ютері. Результати повертаються користувачу через канал зв'язку, забезпечуючи швидкий і зрозумілий зворотний зв'язок.

Таким чином, AI асистента дозволяє реалізувати його основні функції голосових запитів, інтеграцію з API, автоматизацію завдань, взаємодію з додатками, а також забезпечує ефективну і зручну взаємодію з користувачем. На рис. 1 показується використання вбудованих команд.

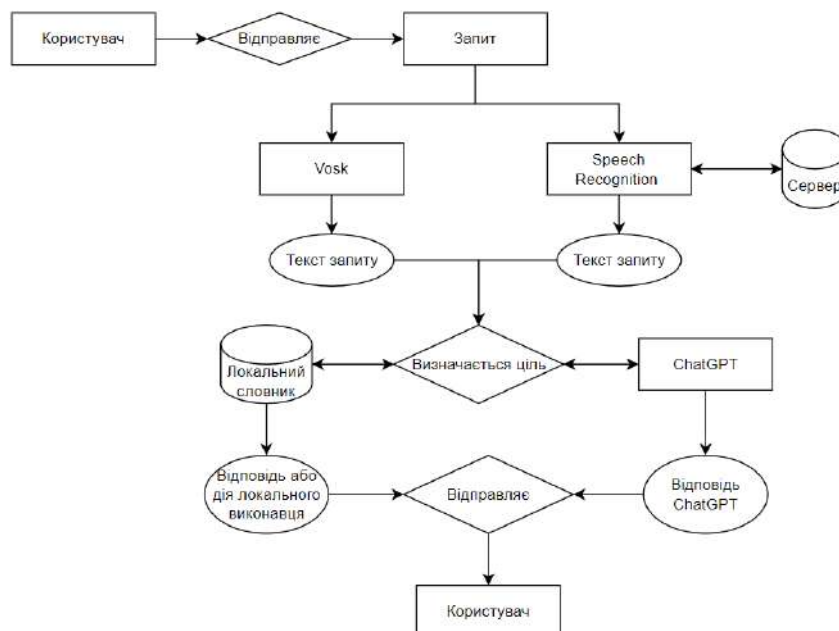


Рис. 1 – Схема роботи AI-асистента

AI-асистент ініціалізує всі необхідні ресурси для роботи з даними. Коли користувач дає запит, він перевіряє, чи є підключення до інтернету, оскільки це може вплинути на API чи онлайн сервіси. Далі йде етап обробки введених даних якщо це голосова команда, вона проходить через систему розпізнавання мови Vosk-офлайн або Speech Recognition-онлайн. AI-асистент конвертує голосові

дані в текст. Після того, як команда була перетворена у текст, асистент розпізнає ключові слова та фрази, щоб зрозуміти, яку задачу потрібно виконати.

Після аналізу тексту асистент перевіряє, чи є в його базі даних необхідні скрипти для виконання цієї задачі, якщо відповідь знайдена, AI асистент виконує команду або надає відповідь на запит користувача.

Якщо команда вимагає доступу до зовнішніх сервісів, AI асистент звертається до потрібних API або посилань. Після того, як задача виконана, асистент надає користувачу результат. На рисунку 2 наведено інтерфейс додатку, та запит на побудову графіка по коду. На рисунку 3 виконано вже обробку запита користувача та наведено результат виконання. Були проведені експериментальні дослідження для виявлення часу відповіді та точності виконання. В таблиці 1 наведено фрагмент експерименту у вигляді різних запитів до AI-асистента.

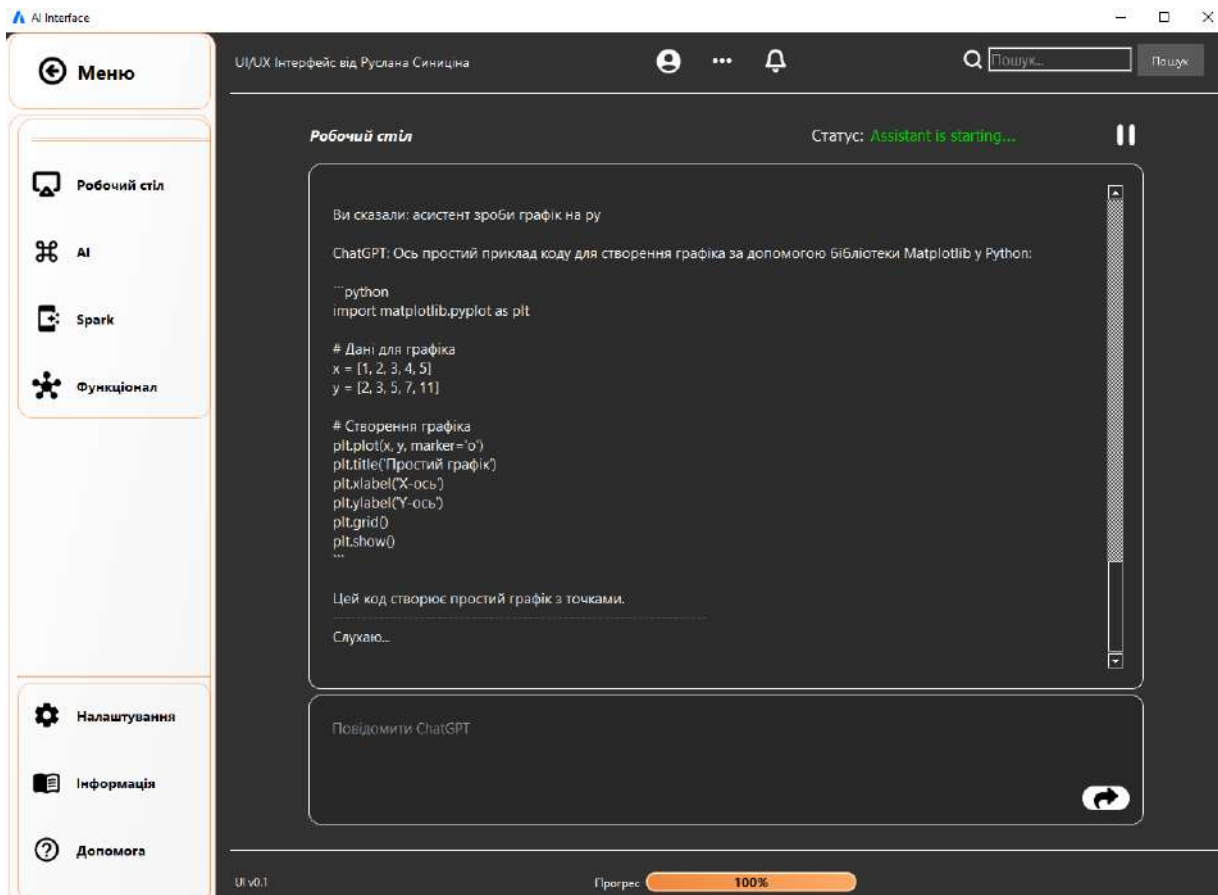


Рис. 2 – Перевірка працездатності та правильності відповіді, запит до AI – побудова графіка

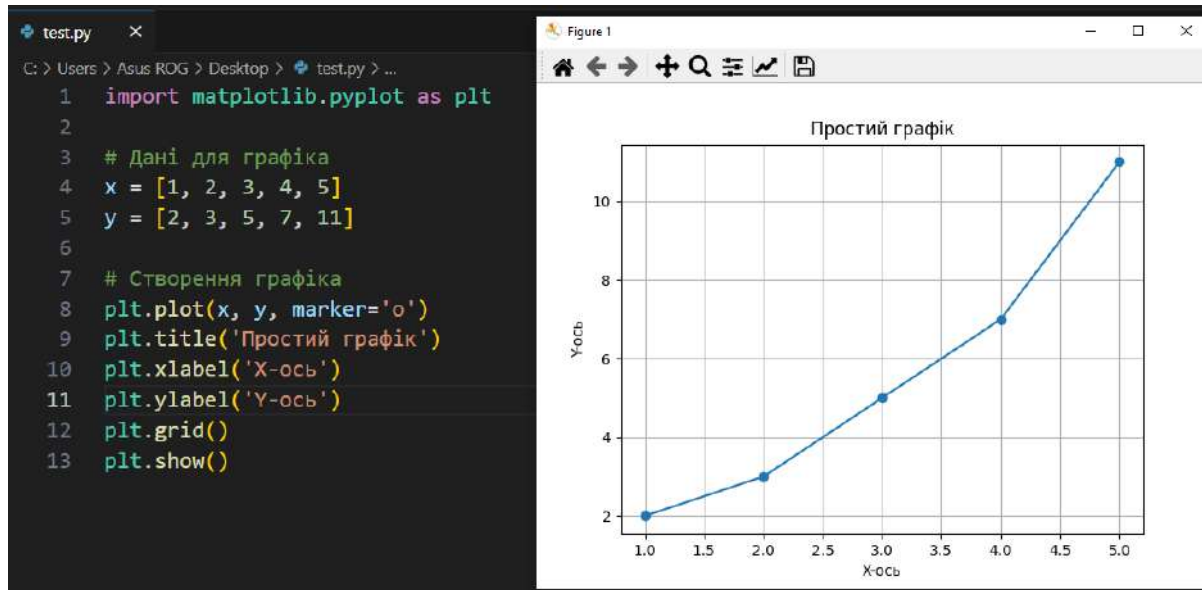


Рис. 3 – Результати запиту користувача на побудову графіка

Таблиця 1 – Результат проведення експерименту

Запит	Точність виконання	Швидкість виконання
Скільки буде п'ять помножити на сім і поділити на три?	1.0	0.421 секунд
Що таке штучний інтелект і як він впливає на сучасний світ?	0.89	2.18 секунд
How do you say hello world in Ukrainian?	1.0	0.514 секунд
Що таке мова Python і яка відмінність від C++?	0.71	2.35 секунд
Створи мені таблицю мов програмування та опиши для чого вони	0.83	1.67 секунд

Аналізуючи отримані результати тестування AI асистента можна зробити висновок, що результати вийшли цілком позитивними. AI асистент розуміє як українську так і англійську мову, завдяки тренуванню моделі. Основною перевагою є те, що асистент може обробляти команди користувачів швидко та точно, забезпечуючи користувачам високу ефективність у виконанні різноманітних завдань. Також, значним плюсом є інтеграція з іншими додатками та програмами, що дозволяє безперешкодно виконувати завдання.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Було реалізовано AI асистента, який здатний значно покращити виконання різноманітних завдань локального користувачів. Застосування цього програмного забезпечення дозволяє знизити рівень надмірної інформації, підвищити швидкість обробки запитів і забезпечити точність виконання команд. Однією з головних переваг цієї системи є зменшення ймовірності помилок при виконанні рутинних завдань, що дозволяє заощадити час і зусилля користувачів. Розроблена система допомагає з оптимізацією алгоритмів різнопланових завдань, зокрема в автоматизації повсякденних процесів, таких як відкриття файлів, запуск скриптів, управління комп'ютером та взаємодія з іншими додатками. Програмне забезпечення також має великий потенціал для розвитку в якості консультативного помічника, допомагаючи студентам та професіоналам працювати з новими технологіями. Що в свою чергу дозволяє AI асистенту адаптуватися до змінюваних потреб користувачів, підвищуючи точність і ефективність виконання завдань у будь якому середовищі.

Список бібліографічного опису

1. Install Vosk – Режим доступу: <https://alphacephei.com/vosk/>
2. Speech Recognition – Режим доступу: <https://pypi.org/project/SpeechRecognition/>
3. API ChatGPT – Режим доступу: <https://platform.openai.com/docs/overview>
4. Install PyQt6 – Режим доступу: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/>
5. QTextEdit from PyQt6 – Режим доступу: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtWidgets/QTextEdit.html>
6. Conversational AI Assistant Using Artificial Neural Networks. – Режим доступу: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/127803/1/TAA0106.pdf>

7. Sanjaya, Ovi & Bukhori, Saiful & Furqon, Muhammad. (2023). Virtual Assistant for Thesis Technical Guide Using Artificial Neural Network. Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining. 6. 188-196. 10.24014/ijaidm.v6i2.23473.
8. Bull, Christopher & Kharrufa, Ahmed. (2023). Generative AI Assistants in Software Development Education. 10.48550/arXiv.2303.13936.
9. Sergeyuk, Agnia & Golubev, Yaroslav & Bryksin, Timofey & Ahmed, Iftekhar. (2024). Using AI-Based Coding Assistants in Practice: State of Affairs, Perceptions, and Ways Forward. 10.2139/ssrn.4900362.
10. Baskaran, G & Raj, Harrish & Kumar, S & Anand, R. (2021). To Build A Virtual Assistant By Using Artificial Intelligence. The Open Artificial Intelligence Journal. 2. 1134. 10.6084/m9.figshare.14446467.

References

1. Install Vosk – Link: <https://alphacephei.com/vosk/>
2. Speech Recognition – Link: <https://pypi.org/project/SpeechRecognition/>
3. API ChatGPT – Link: <https://platform.openai.com/docs/overview>
4. Install PyQt6 – Link: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/>
5. QTextEdit from PyQt6 – Link: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/PySide6/QtWidgets/QTextEdit.html>
6. Conversational AI Assistant Using Artificial Neural Networks. – Link: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/127803/1/TAA0106.pdf>
7. Sanjaya, Ovi & Bukhori, Saiful & Furqon, Muhammad. (2023). Virtual Assistant for Thesis Technical Guide Using Artificial Neural Network. Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining. 6. 188-196. 10.24014/ijaidm.v6i2.23473.
8. Bull, Christopher & Kharrufa, Ahmed. (2023). Generative AI Assistants in Software Development Education. 10.48550/arXiv.2303.13936.
9. Sergeyuk, Agnia & Golubev, Yaroslav & Bryksin, Timofey & Ahmed, Iftekhar. (2024). Using AI-Based Coding Assistants in Practice: State of Affairs, Perceptions, and Ways Forward. 10.2139/ssrn.4900362.
10. Baskaran, G & Raj, Harrish & Kumar, S & Anand, R. (2021). To Build A Virtual Assistant By Using Artificial Intelligence. The Open Artificial Intelligence Journal. 2. 1134. 10.6084/m9.figshare.14446467.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-16>

УДК 004:8

Шикеринець Степан Тарасович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0000-8748-5765>

Улічев Олександр Сергійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-3736-9613>

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», м. Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ ДО ДЕРЖАВНИХ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ

Шикеринець С.Т., Улічев О.С. Перспективи використання машинного навчання для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативних вимог. Забезпечення відповідності програмних продуктів до різноманітних державних нормативних вимог, галузевих стандартів та кращих практик є одним з ключових завдань для сучасних організацій та компаній що розробляють чи впроваджують дані продукти. У статті розглядаються перспективи використання машинного навчання для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативних вимог. Проаналізовано сучасні методи машинного навчання, які можуть бути застосовані для автоматизації процесів перевірки програмних продуктів. Оцінка потенціалу впровадження машинного навчання виявила суттєві переваги, включаючи підвищення ефективності, точності та масштабованості процесів перевірки відповідності. Описано потенційні переваги та виклики впровадження цих технологій у сфері забезпечення відповідності програмних продуктів до державних стандартів. На основі отриманих результатів запропоновано практичні рекомендації щодо ефективного впровадження машинного навчання.

Ключові слова: машинне навчання, програмне забезпечення, державні нормативні вимоги, відповідність, автоматизація, верифікація.

Shykerynets S., Ulichev O. Prospects for the Use of Machine Learning to Ensure Compliance of Software Products with State Regulatory Requirements. Ensuring compliance of software products with various government regulatory requirements, industry standards and best practices is one of the key tasks for modern organizations and companies that develop or implement these products. In this article, the prospects for using machine learning to ensure compliance of software products with government regulatory requirements are discussed. Modern machine learning methods that can be applied to automate the process of verifying software products for compliance with governmental requirements have been analyzed. An assessment of the potential of implementing machine learning has discovered significant benefits, including increased efficiency, accuracy, and scalability of compliance verification processes. The potential benefits and challenges of implementing these technologies in the field of ensuring compliance of software products with state standards are described. Based on the obtained results practical recommendations for the effective implementation of machine learning are proposed.

Keywords: machine learning, software, government regulatory requirements, compliance, automation, verification.

Постановка проблеми. У сучасних організаціях програмні продукти є невід'ємною частиною бізнес-процесів, забезпечуючи ефективність та конкурентоспроможність компаній. Проте, забезпечення відповідності програмного забезпечення різноманітним державним нормативним вимогам, галузевим стандартам та практикам стає все більш складним завданням. Зростання кількості регуляторних актів, їхньої складності та взаємозв'язку створюють значні труднощі для компаній та організацій що проводять розробку та впровадження програмних продуктів. Крім того, швидкий розвиток технологій та змін у законодавстві вимагають постійного оновлення знань та адаптації процесів забезпечення відповідності, що часто призводить до високих витрат часу та ресурсів.

Традиційні методи перевірки відповідності, такі як ручний аудит та статичний аналіз, мають обмежену ефективність у контексті великих та складних програмних систем. Ці методи не завжди здатні швидко адаптуватися до змін нормативних вимог та виявляти потенційні невідповідності. У зв'язку з цим, виникає потреба у впровадженні інноваційних підходів, які можуть автоматизувати та оптимізувати процеси перевірки на забезпечення відповідності до регуляторних вимог. Машинне навчання пропонує перспективні рішення для автоматизації аналізу нормативних документів, виявлення ризиків та прогнозування потенційних проблем, що може суттєво підвищити ефективність та точність процесів перевірки відповідності програмних продуктів державним вимогам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У останні роки застосування машинного навчання для забезпечення відповідності програмного забезпечення державним нормативним вимогам стало предметом активних досліджень у науковій спільноті. Багато публікацій зосереджуються на розробці методів, які можуть автоматизувати процеси перевірки та верифікації,

підвищуючи ефективність та точність цих процедур. Одним із ключових напрямків є використання глибинного навчання для аналізу великих обсягів нормативних документів. Наприклад, дослідження Малінгера К. [1] розглядає застосування моделей МН для аналізу технологічної готовності фермерів до впровадження технологій точного тваринництва (Precision Livestock Farming, PLF), визначаючи ключові бар'єри та драйвери прийняття інновацій. Отримані результати допомагають адаптувати дизайн технологій і бізнес-стратегії, покращуючи доступність, підтримку та інтеграцію прогресивних рішень МН у фермерські господарства.

Результати показали що модель успішно ідентифікує ключові вимоги фермерів та бар'єри впровадження технологій, спрощуючи розробку рішень і стратегії для різних груп користувачів.

Дослідник Гак І.У. з колегами [2] провели важливе дослідження, що доводить ефективність застосування машинного навчання для аналізу екологічних даних, відкриваючи перспективи для подальшого розвитку автоматизованих систем у галузі екологічного моніторингу. Дослідження Фавзі А.Г. [3] аналізує інтеграцію машинного навчання з DevOps-практиками для автоматичного виявлення аномалій у логах і метриках продуктивності програмного забезпечення. Автори пропонують гібридний підхід, який використовує компоненти для моніторингу аномалій до та після розгортання системи, що підвищує гнучкість і ефективність процесів DevOps.

Увагу привертає дослідження, яке провів Марек П. [4] щодо пояснювальних моделей машинного навчання (Explainable AI) в галузях де застосування даних моделей мають кричне значення щодо забезпечення прозорості рішень, що може бути використане для застосування щодо забезпечення відповідності програмних продуктів до нормативних вимог.

Наукова робота Муруган С. [5] розкриває застосування машинного навчання для управління фінансовими ризиками, а саме прогнозування ризиків (виявленні потенційних проблем), аналізу великих даних та оптимізації процесів. Також в роботі описано як застосування МН може допомогти у проактивному підході до управління ризиками.

Стаття Браунк А. та інших авторів [6] акцентує увагу на використанню федеративного навчання (Federated Learning, FL) у медичних дослідженнях з метою аналізу широкого набору персональних даних (пацієнтів). Федеративне навчання дає можливість тренувати моделі машинного навчання без необхідності передачі даних до централізованих серверів. Тренування відбувається на даних що зберігаються локально та відповідає вимогам GDPR. Для підвищення конфіденційності даних пропонується використання диференційної конфіденційності (Differential Privacy) та безпечного багатостороннього обчислення (Secure Multiparty Computation)ю

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Не дивлячись на вагомий досягнення у забезпеченні відповідності програмних продуктів до державних вимог завдяки застосуванню машинного навчання, існує ряд проблем, які залишаються недостатньо вивченими або потребують подальшого дослідження. Виявлення цих невирішених проблем є важливим для подальшого розвитку ефективних рішень у даній сфері.

По-перше, одна з основних проблем полягає у забезпеченні якості та доступності даних для навчання моделей. Такі дослідження, як робота Менлі К. та колег [7], аргументують, що важливість високоякісних та репрезентативних даних є ключовими для створення точних моделей. Використання якісних наборів даних дозволяє уникати помилкових висновків, пов'язаних з неповними або неточними даними. Завдяки зростанню доступності великих об'ємів даних, їхня якість стає критичним фактором.

По-друге, питання пояснюваності моделей МН залишається важливим викликом. Сьогодні концепції пояснюваного штучного інтелекту (Explainable AI, xAI) активно розвиваються, проте, на основі роботи Клайн Т. та Волтера Т. [8], їхнє застосування у сфері забезпечення відповідності програмного забезпечення потребує подальшого вдосконалення. Наукова робота [8] досліджує важливість пояснення роботи машинного навчання, що дозволяє оцінити вплив окремих факторів на результати роботи моделей. Автори акцентують актуальність і перспективність впровадження xAI для створення прозорих і зрозумілих рішень, де необхідно забезпечити високу прозорість та довіру з боку регуляторних органів.

По-третє, інтеграція МН з існуючими процесами розробки та управління програмним забезпеченням, зокрема з такими як практика DevOps. Не зважаючи на існуючі перспективи використання МН для оптимізації процесів тестування та моніторингу відповідності до регуляторних вимог, практичні аспекти такої інтеграції залишаються вивченими на недостатньому рівні. Особливо це стосується сумісності між різними інструментами та платформами, а також високу складність становить управління змінами в моделях МН у реальному часі.

Четвертим не вирішеним на достатньому рівні питанням є етичні та правові аспекти використання МН для забезпечення відповідності. Хоч етичні міркування активно обговорюються, необхідно розробити й встановити чіткі правила та стандарти для застосування МН у контексті дотримання відповідності державним вимогам. Це включає створення спеціалізованих етичних кодексів та нормативно-правових актів, які враховують специфіку використання машинного навчання у забезпеченні відповідності програмних продуктів державним вимогам. Крім того, існує обмежена кількість досліджень, що фокусуються на адаптивності та гнучкості моделей МН у динамічних та швидко-змінних нормативних середовищах. В умовах швидких змін нормативних вимог, системи МН повинні бути гнучкими та динамічними, здатні до швидкої адаптації та оновлення без значних втрат у продуктивності та точності. Це актуалізує питання розробки нових алгоритмів та архітектур, які можуть швидко та точно реагувати на зміни та підтримувати актуальність моделей.

Важливим аспектом є забезпечення крос-дисциплінарної (крос-галузевої) співпраці між фахівцями з машинного навчання, програмної (комп'ютерної) інженерії та нормативної політики. Успішність впровадження МН для забезпечення відповідності державним вимогам потребує інтеграції знань та досвіду з різних галузей, що дозволяє створювати більш комплексні та ефективні рішення. Такий підхід дозволяє врахувати безліч аспектів процесу забезпечення відповідності вимогам та підвищує ймовірність успішної реалізації проектів.

Таким чином, хоч існуючі дослідження демонструють значний потенціал машинного навчання у сфері забезпечення відповідності програмного забезпечення до державних нормативних вимог, проте, залишаються численні не вирішені питання. Подолання цих викликів потребує подальших досліджень та розвитку інноваційних підходів та методів, що дозволять максимально ефективно використовувати можливості МН для забезпечення високої якості та безпеки програмних продуктів.

Формулювання мети дослідження. Метою даного дослідження є широкий аналіз та оцінка можливостей застосування машинного навчання (МН) для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативних вимог. Це дослідження спрямоване на визначення ефективних підходів та інструментів машинного навчання, що можуть бути інтегровані у процеси розробки та верифікації програмних продуктів для забезпечення високого рівня відповідності встановленим стандартам та вимогам.

Основна частина дослідження. Застосування сучасних методів машинного навчання (МН) стає все більш актуальним для забезпечення відповідності програмних продуктів нормативним вимогам, галузевим стандартам та найкращим практикам. Основні методи, що мають потенціал для автоматизації процесів перевірки та верифікації, включають глибоке навчання (Deep Learning, DL), обробку природної мови (Natural language processing, NLP), виявлення аномалій, навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL). Кожен з цих методів має свої унікальні можливості, переваги та обмеження, що визначають їх ефективність у контексті даного дослідження.

Глибоке навчання (DL) є одним із найпотужніших інструментів МН, який дозволяє моделювати складні залежності та виявляти приховані патерни в даних. Завдяки багаторівневим нейронним мережам, глибоке навчання може аналізувати великі обсяги інформації, що є необхідними для автоматичного аналізу нормативних документів та визначення відповідності програмних продуктів встановленим стандартам. Однією з ключових переваг глибокого навчання (DL) є його здатність до самонавчання та адаптації до нових даних, що дозволяє системам постійно вдосконалюватися та гнучко реагувати на зміни в нормативно-правових актах. Проте, глибокі моделі вимагають значних обчислювальних ресурсів та великих обсягів навчальних даних, що може бути обмежуючим фактором в контексті даного напрямку застосування.

Обробка природної мови (NLP) може бути інструментом для автоматизації аналізу текстів нормативно-правових документів. Обробка природної мови (NLP) дозволяє системам розуміти, інтерпретувати та виділяти ключові вимоги з великих обсягів тексту. Дана особливість таких моделей значно спрощує процес інтеграції нормативно-правових вимог у розробку та аналіз програмних продуктів. Однією з переваг напрямку обробки природної мови (NLP) є здатність до семантичного аналізу, що дозволяє точніше визначати зміст та контекст вимог. Проте, NLP може стикатися з труднощами при обробці складних юридичних текстів, де необхідна висока точність та глибоке і однозначне розуміння нюансів мови та понять.

Виявлення аномалій (anomaly detection, AD) є ще одним важливим методом МН, який використовується для ідентифікації невідповідностей та потенційних ризиків у програмних системах. Цей метод дозволяє автоматично виявляти нетипові патерни в роботі системи, що можуть свідчити про порушення нормативних вимог. Виявлення аномалій (AD) є корисним для проактивного управління ризиками, оскільки дозволяє своєчасно реагувати на потенційні загрози під час створення програмних продуктів. Однак, цей метод може бути менш ефективним у випадках, коли аномалії не мають чітких патернів або коли дані є недостатньо якісними.

Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) також має переваги як от здатність адаптуватися до динамічних умов та навчатися на основі досвіду. Це дозволяє системам швидко реагувати на нові виклики та зміни у законодавстві. Також навчання з підкріпленням (RL) може виявляти та виправляти проблемні місця нетипову поведінку, які суперечить нормативно-правовим вимогам або іншим стандартам. Проте застосування навчання з підкріпленням (RL) має і свої недоліки. Незважаючи на попередньо перелічені переваги, процес навчання RL-моделей може бути ресурсомістким та тривалим. Також для таких систем є складним завдання забезпечення стабільності та повторюваності результатів. Не варто забувати і про ризик того що такі системи можуть приймати несподівані рішення, які важко передбачити. А такі ризики у сфері забезпечення відповідності нормативно-правовим вимогам може призвести до неочікуваних порушень з відповідними наслідками.

Крім використання окремих методів, важливо розглядати їхню інтеграцію для досягнення максимального корисного ефекту. Для прикладу, поєднання глибинного навчання (DL) з обробкою природної мови (NLP) дозволяє створювати системи, здатні одночасно аналізувати текстові вимоги та інтегрувати їх у процеси верифікації програмних продуктів. Такий підхід сприяє комплекснішому та гнучкішому аналізу, забезпечуючи високу точність та ефективність перевірок. Проте, тут існують певні обмеження, пов'язані з застосуванням цих методів. Основними проблемами є потреба якісних та репрезентативних даних. Також складність інтеграції різних методів та забезпечення їхньої взаємодії. Для подолання даних недоліків необхідно продовжувати розробку нових алгоритмів та методів інтеграції, що дозволять ефективніше використовувати потенціал машинного навчання.

Відповідно, глибинне навчання (DL), обробка природної мови (NLP), виявлення аномалій (AD) та навчання з підкріпленням (RL) представляють собою потужні інструменти, які можуть значно покращити процеси забезпечення відповідності програмних продуктів до нормативно-правових вимог. Але для їх ефективного застосування необхідно вирішити низку технічних та методологічних завдань, що дозволить максимально використовувати їхні переваги та мінімізувати обмеження.

Також питання пояснюваності моделей (xAI) машинного навчання (МН) залишається важливим викликом. Існуючі методи xAI часто недостатньо ефективні для пояснення рішень у складних нормативно-правових середовищах, де необхідно забезпечити високу прозорість та довіру з боку регуляторних органів. Пояснюваність моделей машинного навчання є надзвичайно важливою, оскільки розробники та регулятори повинні мати змогу зрозуміти, як і чому система приймає рішення. Це актуально у випадках, коли невідповідності можуть мати серйозні наслідки для безпеки, конфіденційності чи відповідності законодавству. Без належної пояснюваності, моделі машинного навчання можуть бути сприйняті як "чорні ящики" (BlackBox), що ускладнює їхнє прийняття та довіру з боку регуляторно-контролюючих органів та розробників програмних продуктів.

Однією з основних проблем у застосуванні пояснюваних моделей є баланс між складністю моделі та її здатністю бути поясненою. Більш складні моделі, такі як глибинні нейронні мережі (Deep Neural Network, DNN), можуть досягати високої точності, але їхні внутрішні механізми важко а то й неможливо інтерпретувати. В свою чергу це створює дилему: як зберегти високу точність прогнозів з однієї точки зору, та одночасно забезпечуючи достатню прозорість рішень з другої. Відповідь на це питання лежить у розвитку нових методів xAI, які дозволяють забезпечувати пояснюваність без значного зниження продуктивності моделей. Дослідження показують, що існують різні підходи до покращення пояснюваності моделей МН. Наприклад, методи локальної пояснюваності, такі як LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) [9] та SHAP (SHapley Additive exPlanations) [10], дозволяють аналізувати окремі рішення моделей, надаючи зрозумілі пояснення для користувачів. Але дані методи мають свої обмеження, оскільки вони зосереджені на локальних поясненнях і не завжди можуть відображати глобальну поведінку моделі. На даний час, стає все більш актуальним розвиток моделей, які заздалегідь проєктовані та розроблені для

підвищення і прощення пояснюваності. В таких моделях намагаються поєднати високу точність результатів із забезпеченням чіткого розуміння процесу прийняття рішень.

Іншим важливим аспектом є інтеграція пояснених моделей з процесами управління відповідністю програмних продуктів до державних вимог. Це включає в себе створення стандартів та методів, що забезпечують систематичний підхід до пояснення рішень моделей машинного навчання у контексті нормативно-правової бази. Впровадження таких методів та стандартів сприятиме підвищенню довіри до автоматизованих систем та полегшить їхнє використання та впровадження.

Також важливою складовою є кваліфікація спеціалістів, що працюють з даними моделями. Вони повинні мати глибоке розуміння як технічних аспектів машинного навчання, так і нормативно-правових вимог, щоб ефективно впроваджувати та управляти поясненими моделями. Це дозволить створювати більш ефективні та надійні системи, що відповідають високим стандартам якості.

Наступним аспектом який необхідно вирішити є інтеграція машинного навчання (ML) з існуючими процесами та підходами розробки програмних продуктів, такими як DevOps. Така інтеграція дасть можливість для кращої автоматизації процесів тестування відповідності програмних продуктів. Однією з основних проблем такої інтеграції є сумісність між різними інструментами та платформами, що використовуються в DevOps та машинному навчанні (ML). Ще одним викликом є управління змінами в моделях машинного навчання у реальному часі. Оскільки моделі машинного навчання потребують постійного оновлення та перенавчання на нових даних для підтримки їхньої актуальності та точності. Інтеграція цих процесів з DevOps практиками вимагає створення ефективних механізмів для безперервного навчання та оновлення моделей, що може виявитися комплексним та складним завданням через необхідність забезпечення стабільності та безпеки систем що розробляються.

Для подолання цих викликів необхідно паралельно розробляти та впроваджувати гнучкі та масштабовані архітектури, що дозволять відносно легко та швидко інтегрувати системи машинного навчання з існуючими DevOps інструментами. Варто зазначити що автоматизація процесів оновлення та моніторингу моделей машинного навчання допоможе забезпечити їхню безперебійну роботу у режимі реального часу.

Важливим питанням є етичні та правові аспекти використання машинного навчання (MN) для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативних вимог. Хоч етичні аспекти і активно обговорюються в науковій спільноті, існує суттєва потреба у розробці чітких правил та стандартів для застосування машинного навчання (MN) у даному контексті. Це включає створення спеціалізованих етичних кодексів та нормативно-правових документів, що враховують специфіку використання машинного навчання у даній сфері. Відсутність стандартів застосування машинного навчання може призвести до порушень конфіденційності, дискримінації або інших етичних проблем.

Крім того, існує обмежена кількість досліджень, що фокусуються на адаптивності та гнучкості моделей машинного навчання у динамічних середовищах пов'язаних зі змінними нормативно-правовими вимогами. Системи машинного навчання повинні бути здатні до швидкої адаптації та оновлення без значних втрат у продуктивності та точності в умовах швидких змін нормативних вимог. Це вимагає розробки нових алгоритмів та архітектур, які можуть ефективно реагувати на зміни та підтримувати актуальність моделей. Поточні методи часто не можуть забезпечити достатньої гнучкості для роботи в умовах постійних змін, що обмежує їхнє застосування у реальному робочому середовищі. Для подолання таких викликів необхідно сфокусуватися на створенні адаптивних моделей, що будуть мати змогу швидко інтегрувати нові нормативні вимоги без необхідності повного перенавчання

Також однією з проблем у даному контексті застосуванні машинного навчання (MN) є забезпечення високої якості та доступності даних для навчання моделей. Збір та анотація таких даних часто є складним процесом через конфіденційність інформації та відсутність стандартизованих репрезентативних наборів даних. Важливо впроваджувати стандартизовані процесів збору та таких даних. Розробка чітко визначених протоколів для збору даних сприятиме підвищенню їхньої якості та сумісності між різними проектами тільки якщо буде забезпечена відповідність вимогам конфіденційності та безпеки. Співпраця з державними органами та іншими зацікавленими сторонами може забезпечити доступ до потрібних даних та сприяти створенню репрезентативних наборів, які відповідають специфічним нормативно-правовим вимогам.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній статті було розглянуто перспективи використання машинного навчання (МН) для забезпечення відповідності програмних продуктів до державних нормативно-правових вимог. Проведене дослідження дозволило проаналізувати ключові аспекти, що впливають на ефективність та успішність впровадження машинного навчання у даній сфері використання, а також визначити основні недоліки та виклики, які потребують додаткового вивчення та вирішення:

1. Концепції пояснюваного штучного інтелекту (Explainable AI, XAI) активно розвиваються. Проте їхнє застосування у даній сфері потребує подальшого вдосконалення. Пояснюваність моделей є критично важливим аспектом для забезпечення довіри та використання з боку розробників, користувачів та регуляторних державних органів. Необхідно розробляти нові та вдосконалювати вже існуючі методи і архітектури. Ці методи повинні дозволити отримувати однозначні та чіткі пояснення рішень моделей без значного зниження їх точності та продуктивності.

2. Адаптивність та гнучкість моделей МН у динамічних нормативних середовищах також є невирішеним питанням. В умовах швидких змін нормативно-правових вимог від систем машинного навчання вимагається здатність до швидкої адаптації та оновлення без значних втрат у продуктивності та точності. Впровадження методів безперервного навчання може стати ключовим фактором у вирішенні даного виклику.

3. Інтеграція машинного навчання з DevOps практиками дозволяє автоматизувати процеси тестування та забезпечувати постійну актуальність та точність моделей. Проте, практичні аспекти такої інтеграції з моделями машинного навчання у реальному часі, залишаються недостатньо вивченими.

4. Етичні міркування які активно обговорюються вимагають створення чітко визначених стандартів для застосування машинного навчання які враховують специфіку даної сфери. Впровадження таких стандартів сприятиме підвищенню довіри до автоматизованих систем даного типу.

5. Забезпечення високої якості та доступності даних є фундаментальним для успішного застосування машинного навчання у даній сфері. Збір і анотація даних мають перешкоди у вигляді конфіденційності інформації та відсутності якісних стандартизованих наборів. Для подолання цих перешкод необхідно використовувати методи аугментації даних, які дозволяють підвищити різноманітність та обсяг навчальних наборів без компрометації конфіденційності. Необхідно також впроваджувати стандартизацію процесів збору та анотації даних.

На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що для максимального використання потенціалу машинного навчання у поточній сфері необхідно застосувати комплексний підхід. Він включає в себе вдосконалення методів збору та анотації даних, розвиток пояснюваних моделей, інтеграцію машинного навчання з DevOps практиками, розробку етичних та правових рамок, а також забезпечення адаптивності систем у динамічних середовищах.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці нових та вдосконаленні існуючих методів та інструментів, що дозволять ефективніше інтегрувати машинне навчання у даному напрямку, забезпечуючи високу відповідність програмних продуктів до державних вимог. Майбутні дослідження повинні мати на меті не лише подолання існуючих викликів, але й відкриття нових можливостей для використання машинного навчання у даній сфері використання. Це сприятиме підвищенню якості, безпеки та надійності програмного забезпечення, що в свою чергу забезпечить його відповідність сучасним та майбутнім вимогам та стандартам, а це є критично важливим для успішної діяльності сучасних організацій та програмних продуктів що розробляються та впроваджуються.

Список бібліографічного опису:

1. Mallinger, K., Corpaci, L., Neubauer, T., Tikász, I. E., Goldenits, G., & Banhazi, T. (2024). Breaking the barriers of technology adoption: Explainable AI for requirement analysis and technology design in smart farming. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100658>.
2. Haq, I. U., Lee, B. S., Rizzo, D. M., & Perdrial, J. N. (2024). An automated machine learning approach for detecting anomalous peak patterns in time series data from a research watershed in the northeastern United States critical zone. *Machine Learning with Applications*, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2024.100543>.
3. Hany, A., Wassif, K., & Moussa, H. (2023). Framework for Automatic Detection of Anomalies in DevOps. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.02.010>.
4. Pawlicki, M., Pawlicka, A., Uccello, F., Szelest, S., D'Antonio, S., Kozik, R., & Choraś, M. (2024b). Evaluating the necessity of the multiple metrics for assessing explainable AI: A critical examination. *Neurocomputing*, 128282. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128282>.

5. Murugan, M. S., T, S. K., & Marappan, R. (2023). Large-scale data-driven financial risk management & analysis using machine learning strategies. *Measurement: Sensors*, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100756>.
6. Brauneck, A., Schmalhorst, L., Kazemi Majdabadi, M. M., Bakhtiari, M., Völker, U., Baumbach, J., Baumbach, L., & Buchholtz, G. (2023). Federated Machine Learning, Privacy-Enhancing Technologies, and Data Protection Laws in Medical Research: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, 25, Стаття e41588. <https://doi.org/10.2196/41588>.
7. Manley, K., Nyelele, C., & Egoh, B. N. (2022). A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*, 57, 101478. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101478>.
8. Klein, T., & Walther, T. (2024). Advances in explainable artificial intelligence (xAI). *Finance Research Letters*, 106358. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106358>.
9. Cheng, T., Ju, M., Zhang, W., Wu, C., Liu, Q., & Ban, Q. (2025). Investigating the impact of diversion projects on river health using the spherical fuzzy cloud TOPSIS model and the SHapley Additive exPlanation technique. *Ecological Indicators*, 170, 113112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113112>.
10. Hassan, S. U., Abdulkadir, S. J., Zahid, M. S. M., & Al-Selwi, S. M. (2025). Local interpretable model-agnostic explanation approach for medical imaging analysis: A systematic literature review. *Computers in Biology and Medicine*, 185, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.109569>.

References:

1. Mallinger, K., Corpaci, L., Neubauer, T., Tikász, I. E., Goldenits, G., & Banhazi, T. (2024). Breaking the barriers of technology adoption: Explainable AI for requirement analysis and technology design in smart farming. *Smart Agricultural Technology*, 9, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100658>.
2. Haq, I. U., Lee, B. S., Rizzo, D. M., & Perdrial, J. N. (2024). An automated machine learning approach for detecting anomalous peak patterns in time series data from a research watershed in the northeastern United States critical zone. *Machine Learning with Applications*, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2024.100543>.
3. Hany, A., Wassif, K., & Moussa, H. (2023). Framework for Automatic Detection of Anomalies in DevOps. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.02.010>.
4. Pawlicki, M., Pawlicka, A., Uccello, F., Szelest, S., D'Antonio, S., Kozik, R., & Choraś, M. (2024b). Evaluating the necessity of the multiple metrics for assessing explainable AI: A critical examination. *Neurocomputing*, 128282. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128282>.
5. Murugan, M. S., T, S. K., & Marappan, R. (2023). Large-scale data-driven financial risk management & analysis using machine learning strategies. *Measurement: Sensors*, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100756>.
6. Brauneck, A., Schmalhorst, L., Kazemi Majdabadi, M. M., Bakhtiari, M., Völker, U., Baumbach, J., Baumbach, L., & Buchholtz, G. (2023). Federated Machine Learning, Privacy-Enhancing Technologies, and Data Protection Laws in Medical Research: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, 25, Article e41588. <https://doi.org/10.2196/41588>.
7. Manley, K., Nyelele, C., & Egoh, B. N. (2022). A review of machine learning and big data applications in addressing ecosystem service research gaps. *Ecosystem Services*, 57, 101478. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101478>.
8. Klein, T., & Walther, T. (2024). Advances in explainable artificial intelligence (xAI). *Finance Research Letters*, 106358. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106358>.
9. Cheng, T., Ju, M., Zhang, W., Wu, C., Liu, Q., & Ban, Q. (2025). Investigating the impact of diversion projects on river health using the spherical fuzzy cloud TOPSIS model and the SHapley Additive exPlanation technique. *Ecological Indicators*, 170, 113112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113112>.
10. Hassan, S. U., Abdulkadir, S. J., Zahid, M. S. M., & Al-Selwi, S. M. (2025). Local interpretable model-agnostic explanation approach for medical imaging analysis: A systematic literature review. *Computers in Biology and Medicine*, 185, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2024.109569>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-17>

УДК 004.4:004.942:519.6:629.19:681.518

Нікітін Дмитро Михайлович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0003-4388-4996>

Рибіцький Олександр Максимович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-8508-7269>

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АВТОМАТНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДІАГНОСТИЧНИХ ДАНИХ АВТОМОБІЛЯ

Нікітін Д.М., Рибіцький О.М. Інтелектуальні автоматні системи для обробки та аналізу діагностичних даних автомобіля. У статті розглядається підхід до автоматизації процесу діагностики технічного стану автомобілів із використанням інтелектуальних автоматних систем. Основна увага приділяється застосуванню автоматних моделей, які дозволяють підвищити точність аналізу діагностичних параметрів транспортних засобів та зменшити ймовірність помилкових висновків. Запропонована система базується на методах спектрального аналізу, зокрема ортогональних поліномах Фур'є, що дає змогу суттєво зменшити середньоквадратичну похибку діагностичних розрахунків. Дослідження охоплює такі ключові аспекти, як діагностика автомобіля за допомогою OBD-2, методи отримання та обробки кодів помилок DTC, а також використання автоматних моделей для аналізу технічного стану транспортних засобів. Описано основні труднощі інтерпретації OBD-даних та запропоновано підхід, що поєднує автоматні алгоритми з методами спектрального аналізу для підвищення точності діагностики. Запропонована система має можливість адаптації на основі історичних даних, що дозволяє їй самостійно змінювати свої діагностичні параметри залежно від накопиченого досвіду. Таке навчання базується на аналізі трендів, ідентифікації аномалій та коригуванні параметрів автоматної моделі для підвищення точності діагностики. Чисельне моделювання, проведене в рамках дослідження, підтвердило ефективність застосованої методики. Розроблена інтелектуальна автоматна система для діагностики автомобіля демонструє високий потенціал у сфері автоматизованого технічного контролю. Використання автоматних моделей дозволяє підвищити ефективність аналізу діагностичних параметрів, зменшити ймовірність хибних висновків та підвищити загальну надійність транспортних засобів. Перспективи подальших досліджень включають розширення застосування ймовірнісних методів для роботи з великомасштабними наборами діагностичних даних.

Ключові слова: програмна інженерія, формальна модель, логічна модель, обробка даних, автоматні системи, діагностика автомобіля, OBD-2, системний аналіз, прогнозування несправностей, автоматизація діагностики.

Nikitin D., Rybitskyi O. Intelligent automated systems for processing and analysis of vehicle diagnostic data. This article presents an approach to automating the process of vehicle technical condition diagnostics using intelligent automaton-based systems. The primary focus is on the application of automaton models, which enhance the accuracy of diagnostic parameter analysis in vehicles and reduce the likelihood of erroneous conclusions. The proposed system is based on spectral analysis methods, specifically orthogonal Fourier polynomials, which significantly reduce the root-mean-square error of diagnostic calculations. The study covers vehicle diagnostics via OBD-2, methods for retrieving and processing Diagnostic Trouble Codes (DTC), and the use of automaton models to assess the technical condition of vehicles. The main challenges in interpreting OBD data are discussed, and an approach combining automaton algorithms with spectral analysis methods is proposed to improve diagnostic accuracy. The proposed system has adaptive capabilities based on historical data, allowing it to autonomously adjust its diagnostic parameters depending on accumulated experience. The learning process is based on trend analysis, anomaly identification, and parameter adjustments in the automaton model to enhance diagnostic accuracy. Numerical modeling conducted as part of the study confirmed the effectiveness of the applied methodology. The developed intelligent automaton-based vehicle diagnostic system demonstrates high potential in the field of automated technical control. The use of automaton models improves the efficiency of diagnostic parameter analysis, reduces the probability of false conclusions, and enhances vehicle reliability. Future research prospects include expanding the application of probabilistic methods for handling large-scale diagnostic datasets.

Keywords: software engineering, formal model, logical model, data processing, automaton systems, vehicle diagnostics, OBD-2, systems analysis, fault prediction, diagnostics automation.

Постановка наукової проблеми. Сучасні автомобілі оснащені складними електронними системами, які забезпечують управління, контроль та діагностику роботи основних вузлів і агрегатів. Діагностика технічного стану автомобіля відіграє важливу роль у забезпеченні його безпечної експлуатації, зменшенні витрат на обслуговування та зниженні екологічного навантаження. Автоматизовані діагностичні системи, що базуються на аналізі кодів несправностей OBD-2, дозволяють зчитувати параметри датчиків у реальному часі та визначати можливі відхилення в роботі автомобіля. Проте традиційні методи аналізу можуть бути недостатньо точними, що обумовлює необхідність розробки інтелектуальних алгоритмів. Одним з перспективних підходів є використання автоматних моделей, які дозволяють формалізувати процес аналізу технічного стану автомобіля. Впровадження методів апроксимації даних, таких як ортогональні поліноми Фур'є, а також нейромережевих технологій, підвищує точність і швидкість діагностики.

Мета роботи полягає в розробці математичної моделі інтелектуальної автоматної системи, яка забезпечить ефективну обробку та аналіз діагностичних даних автомобіля, використовуючи методи автоматного підходу, ортогональні поліноми Фур'є, нейромережеві алгоритми та аналіз досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення проблеми і на яких ґрунтується дослідження авторів статті.

Аналіз досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях автоматизованих діагностичних систем значна увага приділяється методам математичного моделювання та алгоритмам обробки великих масивів даних. Зокрема, одним із перспективних напрямків є використання багатовимірної поліноміальної регресії (MPR) для оптимізації процесу оцінювання параметрів діагностики.

Згідно з дослідженнями Павлова А., Головченко М. та Мухи І., представленими в їхній роботі, одним із ключових методів аналізу є побудова редундантного представлення багатовимірної поліноміальної регресії (MPR). Вони запропонували два підходи до конструювання багатовимірної регресії: перший – через послідовну регресію уніваріантних поліномів, другий – через використання методу групової обробки даних (GMDH), який є узагальненням відомих евристичних методів самонавчання. Важливим результатом їхнього дослідження стало те, що використання надлишкового представлення дозволяє зменшити похибку моделювання завдяки можливості розбиття коефіцієнтів регресії на підгрупи та їхній незалежний аналіз [10].

Методологія MPR знайшла своє застосування в обробці даних, отриманих під час діагностування транспортних засобів, що підтверджено низкою експериментальних досліджень. Зокрема, використання модифікованих ортогональних багаточленів Форсайта (NOPFS) дозволяє отримувати стійкі оцінки коефіцієнтів регресії та знижувати вплив випадкових шумів. У представлених дослідженнях також розглядається важлива проблема оцінки коефіцієнтів для нелінійних членів MPR. Було доведено, що застосування віртуальних експериментів та алгоритмічного поділу змінних дозволяє досягти прийнятної точності при значному зменшенні обчислювальної складності.

Окрім цього, дослідження доводять ефективність підходу шляхом використання двоетапного методу декомпозиції. Перший етап передбачає розв'язання системи рівнянь для лінійних параметрів, а другий – корекцію коефіцієнтів нелінійних членів за допомогою оптимізаційних методів.

Таким чином, у роботах, які лягли в основу даного дослідження, підтверджується важливість використання редундантного представлення MPR, а також доведено, що застосування адаптивних алгоритмів дозволяє значно покращити точність оцінювання параметрів та зменшити похибку діагностичних висновків.

Діагностика автомобіля за допомогою OBD-2. OBD-2 – це система, що контролює стан основних компонентів автомобіля та передає інформацію про несправності через стандартизований протокол. OBD-2 підтримує взаємодію з бортовим комп'ютером автомобіля та дозволяє зчитувати параметри датчиків, такі як:

- оберти двигуна (RPM);
- температура охолоджувальної рідини;
- тиск у паливній системі;
- викиди оксидів азоту (NOX), CO₂ та інших газів.

Система використовує стандартний діагностичний роз'єм (DLC) та протоколи зчитування даних, такі як CAN, KWP2000 та ISO 9141-2. OBD-2 використовує набір діагностичних кодів помилок (DTC), які стандартизовані для різних марок автомобілів. Ці коди дозволяють автоматизованим системам не лише визначати тип несправності, але й аналізувати історію роботи автомобіля. Завдяки накопиченню історичних даних про стан транспортного засобу можна будувати автоматні моделі, які враховують не тільки поточний стан систем, але й їхню зміну в часі. Структура діагностичного коду виглядає так: P0XYZ, де:

- P – категорія системи (двигун, коробка передач);
- 0 – підкатегорія (0 – стандартний код OBD-2, 1 – специфічний для виробника);
- X – система автомобіля (наприклад, паливна система, система запалювання тощо);
- Y – конкретний компонент або група компонентів (датчик кисню, форсунка);
- Z – порядковий номер помилки (низький рівень напруги, несправний сигнал, перевищення допустимого рівня).

Використання автоматних моделей у процесі обробки кодів DTC дозволяє значно підвищити точність діагностики. Наприклад, часові автомати можуть визначати, чи є певна несправність періодичною або постійною, а імовірнісні моделі можуть розраховувати ймовірність серйозної поломки на основі історії збоїв. Це дозволяє не тільки ідентифікувати поточний стан автомобіля, але й прогнозувати розвиток несправностей, що є важливим для превентивного технічного обслуговування.

Але, попри стандартизацію, OBD-2 має низку обмежень, серед яких: відсутність повної картини стану автомобіля незважаючи на наявність великої кількості кодів; деякі несправності проявляються лише під час руху; відсутність універсальної методики обробки даних тощо. Враховуючи ці особливості можна констатувати факт, що попри ефективність системи OBD-2, як інструменту для зчитування діагностичних параметрів, її дані все одно потребують додаткової обробки. Автоматні методи в цьому контексті допоможуть підвищити точність аналізу та дозволять ефективніше інтерпретувати коди несправностей.

Формалізація автоматної моделі діагностичної системи. Автоматні системи можуть бути класифіковані на три основні типи: кінцеві, часові та імовірнісні автомати. Часові автомати є розширенням кінцевих автоматів, у яких враховуються часові обмеження та події. Це дозволяє аналізувати системи, в яких важливе значення мають часові характеристики процесів. Вони також використовуються у випадках, коли необхідно синхронізувати роботу кількох модулів автомобільної системи, наприклад, для коректного функціонування системи адаптивного круїз-контролю або автоматичного гальмування.

В автомобільній електроніці часові автомати можуть використовуватися для контролю параметрів таких, як швидкість транспортного засобу, тиск масла, температура охолоджувальної рідини. Завдяки можливості враховувати затримки у відгуку системи, часові автомати дозволяють прогнозувати виникнення несправностей і допомагають у розробці систем превентивного обслуговування. Це особливо важливо для сучасних автомобілів, де системи активної безпеки залежать від точного аналізу та прогнозування технічного стану ключових компонентів.

Кінцеві автомати є найбільш базовими моделями, що використовуються для опису систем, які можуть перебувати в обмеженій кількості дискретних станів. Перехід між цими станами відбувається за заздалегідь визначеними правилами у відповідь на вхідні сигнали. Наприклад, у технічній діагностиці кінцеві автомати можуть застосовуватися для моделювання станів роботи двигуна, таких як: «нормальна робота», «перегрів», «відмова». Використання таких автоматів дозволяє формалізувати процес діагностики, чітко визначити умови переходу між станами та автоматизувати виявлення несправностей. Крім того, кінцеві автомати можуть інтегруватися з алгоритмами машинного навчання, що дозволяє системі адаптувати свої правила переходу між станами на основі накопичених діагностичних даних.

Імовірнісні автомати додають ще один рівень складності, вводячи ймовірнісні переходи між станами, що дозволяє враховувати невизначеність у поведінці системи. Це особливо корисно для аналізу даних, отриманих із датчиків, які можуть мати похибки або бути зашумленими. Завдяки цьому система може оцінювати ризики відмов на основі статистичних закономірностей.

Автоматні моделі широко використовуються для опису складних систем, що мають дискретні стани [4;7;8]. У нашому випадку система повинна аналізувати параметри роботи автомобіля та визначати можливі несправності, позначимо:

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – множина вхідних параметрів (температура, тиск, оберти двигуна);

- $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – множина вихідних рішень (двигун у нормі, забруднення каталізатора, надмірне навантаження на трансмісію);

- Q – множина станів автомата, що описує поточний технічний стан автомобіля.

Формальна модель автоматної системи представлена у вигляді функції переходів:

$$\delta : Q \times X \rightarrow Q, \quad (1)$$

де δ – функція, що визначає зміну стану автомобіля залежно від отриманих діагностичних даних.

Вихідна функція автомата визначається як:

$$\lambda : Q \times X \rightarrow Y, \quad (2)$$

де λ – функція ухвалення рішень на основі поточного стану та параметрів системи.
На рисунку 1 представлено граф переходів станів діагностичної системи.



Рис. 1. Граф переходів станів автоматної діагностичної системи

Методи та моделі проектування автоматних діагностичних систем. Як вже зазначалося вище, автоматні моделі є одним із перспективних підходів до створення сучасних діагностичних систем, оскільки вони дозволяють описувати послідовність станів автомобіля та ухвалювати рішення на основі отриманих діагностичних даних.

Одним із потужних математичних інструментів для аналізу складних сигналів є ортогональні поліноми Фур'є. Ортогональні поліноми Фур'є є особливим класом математичних функцій, які використовуються для представлення інших функцій у вигляді рядів. Вони є основою для гармонічного аналізу і широко застосовуються в різних галузях науки та техніки, включаючи фізику, обробку сигналів, квантову механіку, спектральний аналіз та машинобудування.

Ці поліноми формують ортонормовану систему функцій, що означає, що будь-яку періодичну функцію можна розкласти у вигляді їхньої лінійної комбінації з певними коефіцієнтами. Основна ідея ортогональних поліномів Фур'є полягає в тому, що вони забезпечують зручний базис для розкладу функцій у просторі квадратно-інтегрованих функцій. У класичному сенсі, вони визначаються на певному інтервалі, наприклад, $[-\pi, \pi]$, і мають властивість ортогональності щодо скалярного добутку функцій. Це означає, що добуток будь-яких двох різних поліномів інтегрується до нуля на заданому інтервалі. Завдяки цій властивості поліноми Фур'є використовуються для апроксимації складних функцій із заданою точністю, через це дані поліноми відіграють важливу роль у проектуванні автоматних діагностичних систем [11;12;15].

Автомобільні системи генерують величезні обсяги інформації, включаючи сигнали від датчиків швидкості, тиску, температури, вібрацій, рівня викидів тощо. Ці дані можуть містити періодичні або приховані гармонійні компоненти, які важливо виокремити для точного визначення стану автомобіля. Аналіз Фур'є також використовується для попередньої обробки даних та зменшення їхньої розмірності. Наприклад, при розробці автоматної системи для класифікації станів автомобіля можна використовувати коефіцієнти Фур'є як ознаки для побудови автоматних діагностичних алгоритмів. Це допомагає зменшити обсяг інформації, який обробляється автоматом, зберігаючи при цьому найважливіші характеристики сигналу [1;2;6].

Крім того, спектральний аналіз дає змогу визначати та прогнозувати відмови на ранніх стадіях, що підвищує ефективність діагностики. Вбудовані автоматні системи можуть використовувати результати аналізу Фур'є для прийняття рішень у режимі реального часу. Наприклад, якщо система виявляє частотні спотворення, що свідчать про можливу несправність, вона може автоматично перейти у режим аварійної діагностики або надіслати попередження водію.

Як вже зазначалося раніше, поліноми Фур'є є ортогональним базисом у просторі функцій, що визначені на інтервалі $[0, T]$. Вони дозволяють апроксимувати будь-яку функцію $f(t)$, що є достатньо гладкою, у вигляді тригонометричного ряду:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right), \quad (3)$$

де коефіцієнти a_n та b_n визначаються через інтегральні перетворення:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (5)$$

Ці коефіцієнти відображають внесок гармонічних складових у загальний сигнал, що дозволяє аналізувати періодичність змін параметрів автомобіля, таких як температура двигуна, тиск у паливній системі або рівень викидів.

Автомобільні діагностичні системи працюють із сигналами, які можуть мати складну структуру, особливо під час несправностей. Тому використання ортогональних поліномів Фур'є допомагає розділити сигнал на гармонійні компоненти та виділити основні тенденції змін параметрів. Розглянемо, наприклад, часовий ряд тиску в паливній системі $P(t)$, що отримується з OBD-2. Реальний сигнал містить як основну складову, так і шумові впливи. За допомогою розкладу в ряд Фур'є можна отримати згладжену версію сигналу, де N визначає кількість гармонік, що використовуються для апроксимації:

$$P_{approx}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (6)$$

У процесі фільтрації шумових компонент достатньо використовувати лише перші кілька гармонік, оскільки височастотні складові містять переважно випадкові перешкоди. На рисунку 2 представлено порівняння вихідного та згладженого сигналів тиску в паливній системі.

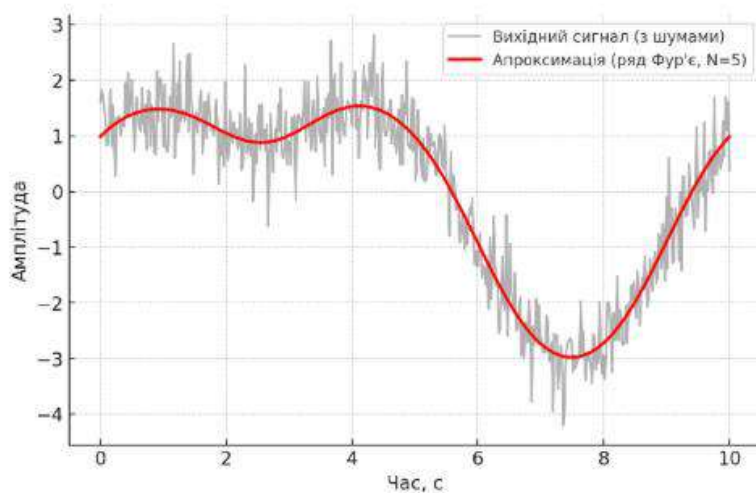


Рис. 2. Апроксимація діагностичних даних

Як ми бачимо, використання методів Фур'є в автоматних діагностичних системах значно покращує точність виявлення несправностей, дозволяє ефективно обробляти великі масиви сигналів та підвищує загальну надійність автомобільних систем. Завдяки інтеграції таких методів у сучасні діагностичні алгоритми можна суттєво оптимізувати роботу транспортних засобів та зменшити ризик раптових поломок.

Ще одною методикою для аналізу складних діагностичних ситуацій, є використання нейромережових автоматів. В складних діагностичних ситуаціях, коли аналітичні методи не дають достатньої точності через нелінійність, шумові ефекти або невизначеність вхідних даних, ефективним підходом стає використання саме нейромережових автоматів. Річ у тому, що ці системи

поєднують властивості класичних формальних автоматів з можливостями глибокого навчання, що дозволяє їм адаптивно реагувати на різноманітні сценарії роботи автомобіля. Нейромережеві автомати здатні виявляти приховані закономірності в діагностичних даних, навчатися на історичних прикладах та приймати оптимальні рішення навіть у випадках, коли класичні алгоритми виявляються недостатньо ефективними [9;14].

Однією із ключових переваг нейромережевих автоматів є їхня здатність працювати із великими масивами діагностичних даних та самостійно виявляти складні взаємозв'язки між параметрами автомобільних систем. Наприклад, у двигуні внутрішнього згорання відхилення у кількох, на перший погляд, несуттєвих параметрах можуть вказувати на майбутню несправність. Аналітичні методи часто не враховують таких взаємозв'язків або потребують складного ручного налаштування моделі. У свою чергу, нейромережеві автомати можуть навчатися на великій кількості реальних сценаріїв та швидко визначати небезпечні тенденції.

Ще однією важливою особливістю є здатність таких систем працювати в умовах неповноти або зашумленості даних. У реальних експлуатаційних умовах автомобільні сенсори можуть видавати неповні або спотворені показники через знос датчиків, вплив зовнішнього середовища чи перешкоди. Нейромережеві моделі, використовуючи властивості рекурентних та трансформерних архітектур, здатні реконструювати відсутню інформацію, прогнозувати її значення на основі попередніх вимірювань та компенсувати шум. Це значно підвищує стійкість діагностичних систем і дозволяє уникнути хибних висновків [3].

Вбудовані нейромережеві автомати також можуть працювати в реальному часі, постійно аналізуючи стан автомобіля та коригуючи діагностичні висновки. Наприклад, у разі виявлення незначних відхилень система може самостійно адаптувати алгоритм оцінки та переглянути діагностичне рішення, ґрунтуючись на нових даних. Це особливо корисно для систем прогнозного технічного обслуговування, де важливо не просто виявляти несправності, а й прогнозувати їх розвиток.

Отже, як зазначалося раніше, у випадках, коли аналітичні методи не дають достатньої точності, доцільно використовувати нейромережеві моделі. Такі системи моделюються як автомат із функцією переходів у вигляді нейронної мережі:

$$Q_{t+1} = f(Q_t, X_t; W), \quad (6)$$

де W – матриця вагових коефіцієнтів мережі.

Навчання нейромережевого автомата здійснюється методом градієнтного спуску:

$$W_{t+1} = W_t - \eta \frac{\partial L}{\partial W}, \quad (7)$$

де L – функція втрат,

η – швидкість навчання.

Таким чином, використання нейромережевих автоматів у діагностиці автомобільних систем відкриває нові можливості для аналізу складних та нелінійних процесів, де традиційні аналітичні методи виявляються недостатньо ефективними. Подальший розвиток нейромережевих автоматів може значно покращити автономність та інтелектуальність діагностичних систем, зменшуючи потребу в ручному налаштуванні параметрів та складних аналітичних обчисленнях. Такі системи можуть не лише виявляти несправності, а й оптимізувати алгоритми управління транспортним засобом у режимі реального часу, забезпечуючи адаптивне реагування на змінні умови експлуатації. У перспективі інтеграція нейромережевих автоматів у бортові системи автомобілів сприятиме розвитку повністю автоматизованих сервісних технологій, які мінімізуватимуть людське втручання та підвищуватимуть загальну безпеку та надійність транспортних засобів.

Чисельні розрахунки та експериментальні результати. Нижче ми представимо параметри чисельного експерименту, проведеного для оцінки точності запропонованої автоматної діагностичної системи. Чисельне моделювання допомагає оцінити ефективність автоматної моделі виявлення несправностей та її здатність коректно обробляти діагностичні дані. Для цього було визначено наступні параметри експерименту:

- $n = 50$ – кількість вимірювань у тестовому наборі даних. Це означає, що для оцінки ефективності моделі було взято 50 незалежних спостережень або реєстрацій діагностичних параметрів;

- $z_{10} = 50$ – контрольний рівень параметра. Це еталонне значення одного з ключових параметрів, яке слугує порогом для порівняння з реальними вимірами;
- крок зміни параметра:

$$\Delta_z = \frac{z_{max} - z_{min}}{5} \quad (8)$$

Ця формула визначає, як змінюється контрольований параметр на кожному кроці. Значення z_{max} та z_{min} задають максимальне та мінімальне значення параметра в експерименті, а поділ на 5 дозволяє розрахувати рівномірний крок зміни. Для оцінки точності моделі використовується середньоквадратична похибка (СКП), яка розраховується за формулою [5;13]:

$$D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2, \quad (9)$$

де D – середньоквадратична похибка,

m – кількість точок вимірювання (моментів часу, кроків аналізу),

n – кількість різних параметрів (наприклад, температура двигуна, тиск масла),

y_{ij} – реальні виміряні значення параметра j у момент часу i ,

\hat{y}_{ij} – прогнозовані значення, отримані за допомогою автоматної моделі.

Дана формула обчислює середньоквадратичну похибку для двовимірного набору даних, де y_{ij} – реальні значення параметра, а \hat{y}_{ij} – це прогнозовані значення моделі. Підсумовуючи квадрати відхилень між фактичними та розрахунковими даними по всіх вимірюваннях i і всіх параметрах j , формула визначає середню похибку, усереднюючи її за кількістю вимірювань m .

Автоматна діагностична система може адаптуватися до змін у роботі транспортного засобу шляхом аналізу історичних даних. Це означає, що модель не є статичною, а здатна змінювати свої параметри залежно від накопиченого досвіду. Така адаптація дозволяє підвищити точність діагностики, особливо у випадках, коли окремі несправності проявляються нетиповим чином. Наприклад, якщо система спостерігає поступове збільшення відхилень у значеннях датчика тиску масла, вона може змінювати граничні значення для попередження про несправність, зменшуючи ризик раптового виходу з ладу двигуна.

Аналіз отриманих результатів. Розглянемо вплив кількості вимірювань на середньоквадратичну похибку діагностичної моделі. Аналіз базується на експериментальних даних, які ілюструють ефективність запропонованої методики обробки діагностичних сигналів. На рисунку нижче представлено графік, що демонструє зміну середньоквадратичної похибки в залежності від кількості вимірювань. Це дозволяє оцінити, наскільки ефективно працює автоматна діагностична модель при різних обсягах вхідних даних.

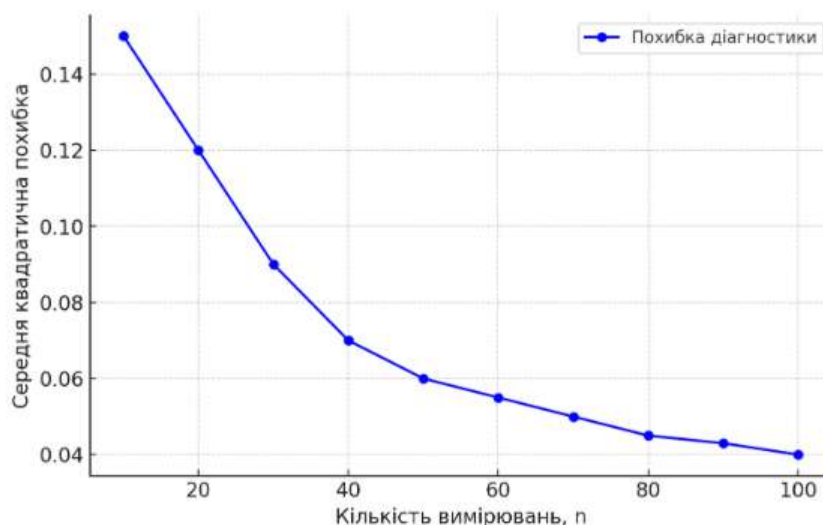


Рис. 3. Графік залежності похибки діагностики від кількості вимірювань

Графік наочно показує, що із збільшенням кількості вимірювань середньоквадратична похибка зменшується. Це очікувано, оскільки велика кількість спостережень дозволяє більш точно апроксимувати діагностичні параметри, усереднюючи випадкові відхилення. Результати експерименту демонструють, що використання ортогональних поліномів Фур'є як методу апроксимації дозволяє значно зменшити похибку аналізу діагностичних даних.

Зокрема, застосування цього методу дає змогу знизити похибку у 1.5-2 рази порівняно з традиційними методами регресійного аналізу. Це пояснюється тим, що ортогональні поліноми Фур'є ефективно фільтрують випадкові шумові компоненти сигналу, залишаючи лише інформативну частину даних. Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність використання автоматних моделей, що базуються на методах спектрального аналізу, зокрема поліномах Фур'є, для покращення точності діагностичних систем.

Висновки. У ході дослідження було запропоновано та проаналізовано інтелектуальну автоматну систему для діагностики автомобіля, яка здатна ефективно обробляти діагностичні параметри та визначати можливі несправності. Однією з головних переваг цієї системи є автоматизація процесу аналізу, що дозволяє зменшити вплив людського фактору та підвищити точність оцінки технічного стану транспортного засобу. Запропонована система дозволяє застосовувати нейромережеві автомати для розв'язання складних діагностичних задач. Це відкриває можливість для адаптивного навчання моделі на основі накопичених даних, що покращує здатність системи розпізнавати нові або рідкісні несправності. Отримані результати підтверджують, що розроблений підхід дозволяє підвищити ефективність аналізу діагностичних даних, що є критично важливим для забезпечення оптимального технічного обслуговування та підвищення надійності транспортних засобів.

Список бібліографічного опису

1. Биков М., Ковтун В., Гаврилюк В. Основи інтелектуальних технологій : електрон. навч. посіб. комбін. (лок. та мереж.) використання. Вінниця : ВНТУ, 2023. 229 с.
2. Васильєв В. Методи та алгоритми цифрової обробки сигналів. Київ: Наук. думка, 2018. 356 с.
3. Кононова К. Машинне навчання: методи та моделі : підруч. для бакалаврів, магістрів та д-рів філософії спец. 051 «Економіка». Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. 301 с.
4. Костиук В. Математичні методи в технічній діагностиці. Київ: Техніка, 2020. 448 с.
5. Поліноміальна регресія – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поліноміальна_регресія (дата звернення: 08.02.2025).
6. Стрелковська І., Паскаленко В. Ряди Фур'є. Інтеграл Фур'є: навч. посіб. для фахівців в галузі зв'язку. Одеса : Держ. ун-т інтелект. технологій та зв'язку, 2021. 122 с.
7. Халдерман Д. Д. Автоматизація та діагностика автомобільних систем. Львів: вид-во Львів. політехніки, 2021. 540 с.
8. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введення в теорію автоматів, мов та обчислень. Харків: Фактор, 2018. 512 с.
9. Шевченко І. Нейромережеві технології в аналізі технічних даних. Харків: НТУ "ХПІ", 2021. 350 с.
10. A Modified Method and an Architecture of a Software for a Multivariate Polynomial Regression Building Based on the Results of a Conditional Active Experiment / A. Pavlov et al. *Advances in Computer Science for Engineering and Education VI*. Cham, 2023. P. 207–222. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_19 (дата звернення: 13.02.2025).
11. Bengio Y., LeCun Y. *Scaling learning algorithms towards AI*. MIT Press, 2007. 240 p.
12. Celant G G., Broniatowski M. *Interpolation and Extrapolation Optimal Designs V1: Polynomial Regression and Approximation Theory*. Wiley. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 288 p.
13. Liu G. P., Yang J. B., Whidborne J. F. *Multiobjective optimization and control*. Baldock: Research Studies Press Ltd, 2003. 330 p.
14. Rudenko O., Bodyanskyi E. *Artificial neural networks: Training manual*. Kharkiv: SMIT Company LLC, 2006. 404 p.
15. Simonoff J., Chatterjee S. *Handbook of regression analysis with applications in R*. Wiley. John Wiley & Sons, Ltd., 2020. 384 p.

References

1. Bykov M., Kovtun V., Havryliuk V. *Osnovy intelektualnykh tekhnolohii: elektronnyi navchalnyi posibnyk kombinovanoho (lokalnoho ta merezhnoho) vykorystannia*. Vinnytsia: VNTU, 2023. 229 p.
2. Vasyliiev V. *Metody ta alhorytmy tsyfrovoy obrobky syhnaliv*. Kyiv: Naukova dumka, 2018. 356 p.
3. Kononova K. *Mashynne navchannia: metody ta modeli: pidruchnyk dlia bakalavriv, mahistriv ta doktoriv filosofii spetsialnosti 051 «Ekononika»*. Kharkiv: KhNU imeni V. N. Karazina, 2020. 301 p.
4. Kostiuk V. *Matematychni metody v tekhnichnii diahnostytsi*. Kyiv: Tekhnika, 2020. 448 p.
5. Polinomialna rehressiia – Wikipediia. Wikipediia. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Поліноміальна_регресія (date of access: 08.02.2025).

6. Strelkovska I., Paskalenko V. Riady Furie. Intehral Furie: navch. posib. dlia fakhivtsiv v haluzi zviazku. Odesa: Derzhavnyi universytet intelektualnykh tekhnolohii ta zviazku, 2021. 122 p.
7. Khalderman D. D. Avtomatyzatsiia ta diahnozyka avtomobilnykh system. Lviv: vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, 2021. 540 p.
8. Khopkroft D., Motvany R., Ulman D. Vvedennia v teoriiu avtomativ, mov ta obchyslen. Kharkiv: Faktor, 2018. 512 p.
9. Shevchenko I. Neiromerezhevi tekhnolohii v analizi tekhnichnykh danykh. Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. 350 p.
10. A Modified Method and an Architecture of a Software for a Multivariate Polynomial Regression Building Based on the Results of a Conditional Active Experiment / A. Pavlov et al. Advances in Computer Science for Engineering and Education VI. Cham, 2023. P. 207–222. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_19 (date of access: 13.02.2025).
11. Bengio Y., LeCun Y. Scaling learning algorithms towards AI. MIT Press, 2007. 240 p.
12. Celant G G., Broniatowski M. Interpolation and Extrapolation Optimal Designs V1: Polynomial Regression and Approximation Theory. Wiley. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 288 p.
13. Liu G. P., Yang J. B., Whidborne J. F. Multiobjective optimization and control. Baldock: Research Studies Press Ltd, 2003. 330 p.
14. Rudenko O., Bodyanskyi E. Artificial neural networks: Training manual. Kharkiv: SMIT Company LLC, 2006. 404 p.
15. Simonoff J., Chatterjee S. Handbook of regression analysis with applications in R. Wiley. John Wiley & Sons, Ltd., 2020. 384 p.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-18>

УДК 004.912

Приходченко Сергій Дмитрович, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-6562-0601>

Приходченко Оксана Юрїївна, к.е.н.

<https://orcid.org/0000-0001-5080-737X>

Шевцова Ольга Сергїївна, PhD

<https://orcid.org/0000-0002-0148-5877>

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

ПРОГРАМНЕ ПОРІВНЯННЯ АНОТАЦІЙ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДИК ОБРОБКИ ПРИРОДНИХ МОВ

Приходченко С.Д., Приходченко О.Ю., Шевцова О.С. Програмне порівняння анотацій наукових статей за допомогою статистичних методик обробки природних мов. Стаття присвячена розробці та аналізу методик автоматизованого порівняння анотацій наукових статей за допомогою статистичних методів обробки природної мови (NLP). Авторами розглянуто сучасні підходи до текстової аналітики, включаючи алгоритми Cosine Similarity, Jaccard Similarity та TF-IDF, а також використання кластеризації та моделей машинного навчання, зокрема SciBERT та BioBERT. Запропонована дослідницька модель програмного забезпечення дозволяє автоматично визначати схожість між текстами, що сприяє ефективному аналізу наукових публікацій, зменшенню дублювання досліджень і підвищенню якості бібліографічного аналізу. Робота має значний потенціал для застосування в науковій комунікації, академічному плагіат-менеджменті та автоматизованих системах оцінки літератури. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення алгоритмів та інтеграцію запропонованої системи з науковими базами даних.

Ключові слова: обробка природної мови (NLP), автоматизований аналіз тексту, наукові анотації, порівняння текстів, автоматизований літературний огляд.

Prykhodchenko S., Prykhodchenko O., Shevtsova O. Software comparison of scientific article annotations using statistical natural language processing methods. This paper presents an advanced approach to the automated comparison of scientific article abstracts using statistical natural language processing (NLP) techniques. The authors analyze state-of-the-art methodologies, including Cosine Similarity, Jaccard Similarity, and TF-IDF, alongside clustering methods and machine learning models such as SciBERT and BioBERT. A research-based software model is proposed to enhance text similarity assessment, facilitating efficient scientific literature analysis, reducing research duplication, and improving bibliographic accuracy. The study highlights the practical application of NLP techniques in academic publishing, plagiarism detection, and automated literature review systems. The proposed system integrates various computational approaches to refine text analysis and classification, making it a valuable tool for researchers and journal editors. Future research directions include optimizing NLP algorithms, incorporating deep learning methods, and integrating the system with major scientific databases to enhance further its applicability and performance in academic and industrial contexts.

Keywords: natural language processing (NLP), automated text analysis, scientific annotations, text comparison, automated literature review.

Вступ. Порівняння наукових текстів – це не лише спосіб аналізу подібностей і відмінностей між дослідженнями, але й ключ до розуміння того, як розвивається наука. У сучасному світі, де обсяг наукових публікацій зростає експоненційно, стає критично важливим володіти інструментами й методами, які дозволяють ефективно зіставляти та аналізувати тексти. Особливо це стосується таких галузей, як Natural Language Processing (NLP), де текст є як об'єктом, так і інструментом дослідження.

Таке порівняння вимагає глибокого розуміння структури та логіки академічного письма. Ми маємо справу з різноманітними жанрами текстів – від статей у рецензованих журналах до тез конференцій, технічних звітів і дисертацій. Кожен із цих жанрів має свої особливості викладу, що впливають на інтерпретацію їхнього змісту. До того ж, тексти можуть бути написані різними мовами, використовувати відмінну термінологію або ж відображати різні підходи до розв'язання однієї проблеми. Вміння аналізувати ці нюанси – це навичка, яка стоїть на перетині лінгвістики, когнітивної науки та комп'ютерних технологій.

Важливим викликом для NLP у цьому контексті є автоматизація процесів, які раніше виконувалися вручну. Виділення ключових ідей з тексту; встановлення чи є між двома роботами схожість в ідеях, чи вони пропонують кардинально різні рішення; виявлення потенційної плагіатності або надмірну залежність від попередніх джерел? Це лише частина питань, які постають перед редакторами сучасних наукових журналів, а також – вченими, що намагаються досягнути нові горизонти знання. Основна мета цієї роботи – створення програмного застосунка, побудованого на

статистичних методиках порівняння текстових масивів, для порівняння інформаційних складових в анотаціях наукових статей.

Постановка задачі. Аналіз подібності допомагає уникнути включення однакових або дуже схожих джерел у список літератури, що підвищує об'єктивність та достовірність дослідження. Врахування подібності наповнення допомагає відфільтрувати дублікати та вибрати найбільш важливі та релевантні джерела для дослідження.

Автоматичне порівняння анотацій статей є актуальним і важливим завданням в галузі комп'ютерних наук, особливо в контексті сучасного наукового дослідження. Так, кількість опублікованих наукових статей зростає експоненційно, і дослідники стикаються з проблемою обробки та аналізу величезних обсягів інформації. Автоматичне порівняння анотацій допомагає швидко виокремити ідентичні або подібні дослідження серед цього потоку даних.

Автоматичне порівняння текстів статей є важливим завданням у галузі обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) та інформаційного пошуку.

Метою статті є аналіз існуючих підходів до програмного автоматизованого порівняння анотацій наукових статей та визначення напрямків подальших досліджень у галузі статистичних методик обробки природної мови для покращення якості та ефективності аналізу наукових текстів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Порівняння програмного забезпечення для аналізу тез наукових статей з використанням методів статистичної обробки природної мови (Natural language processing - NLP) виявляє різноманітні методології та результати. Останні дослідження підкреслюють ефективність різних моделей NLP та статистичних особливостей у класифікації та категоризації наукових рефератів, демонструючи досягнення в автоматизованому скринінгу літератури.

Попередньо навчені мовні моделі Scibert та BioBert були використані для вилучення значущих уявлень та класифікації рефератів. SciBERT продемонстрував покращену категоризацію порівняно з традиційними методами [1], тоді як BioBert показав прийнятну ефективність у медичних рефератних оглядів [2].

Підходи до машинного навчання: Випадкові лісові моделі в поєднанні з вбудовуваннями Word2Vec досягли оцінки F1 0,775 при класифікації медичних рефератів, що вказує на потенціал статистичних ознак у класифікації тексту [3].

Різні дослідження повідомляли про високі бали F1, причому одне досягло 0,92 для класифікації документів з використанням комбінації методів NLP [4]. Це підкреслює надійність цих методів при точній обробці наукових текстів. Також, дослідження показують, що такі моделі, як випадкові ліси та BioBERT, досягають високої точності класифікації, з оцінками F1 близько 0,775 та 0,854 відповідно [2,3]. Класифікація спирається на статистичні властивості тексту, такі як ключові слова та вбудовування, які мають вирішальне значення для розрізнення різних наукових областей [3,5]. Використання оцінки силуету для визначення оптимальної кластеризації в категоризації тексту ще більше підкреслює статистичну суворість, застосовану в цих аналізах [2]. Хоча досягнення в НЛП для абстрактної класифікації є перспективними [6,7], залишаються проблеми [8] в забезпеченні того, щоб моделі добре узагальнювались у різних наукових областях та підтримували точність у галузях, що швидко розвиваються. Порівняння програмного забезпечення для аналізу наукових рефератів з використанням статистичних методів в обробці природної мови (NLP) виявляє різноманітні підходи та інструменти, що покращують скринінг літератури. Кілька досліджень підкреслюють ефективність моделей машинного навчання та методів НЛП у класифікації рефератів, демонструючи їх потенціал для впорядкування процесу огляду. Такі інструменти, як RStudio, Python та IBM SPSS, часто використовуються для статистичного аналізу, кожен з яких пропонує унікальні функціональні можливості, придатні для різних аналітичних завдань [6]. Оцінка цих інструментів часто включає такі показники, як точність, точність та відкликання, які є важливими для оцінки ефективності алгоритмів NLP [8].

Хоча досягнення в НЛП та машинному навчанні дають значні переваги для абстрактної класифікації, залишаються проблеми у забезпеченні надійності та інтерпретації цих автоматизованих систем, особливо у складних областях досліджень.

Дослідження.

Існує декілька алгоритмів та методів для автоматичного порівняння текстів статей. Опишемо застосування основних:

Алгоритм Cosine Similarity визначає схожість між двома текстами на основі кутової відстані між їхніми векторами. Він використовує терм-документну матрицю, де кожен рядок представляє

текст статті, а кожний стовпець - слово (термін). Кутова відстань обчислюється між векторами, які представляють текстові документи. Використовується для порівняння текстів у багатьох галузях, включаючи пошук і ранжування наукових статей за схожістю.

Алгоритм Jaccard Similarity визначає схожість між двома текстами на основі кількості спільних слів у двох текстах, поділених на загальну кількість унікальних слів в обох текстах. Використовується для порівняння текстових документів та пошуку схожих статей.

TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) обчислює вагу кожного терміну (слова) в документі, враховуючи і частоту цього терміну в документі (Term Frequency) і зворотну частоту цього терміну в усіх документах колекції (Inverse Document Frequency). Схожість текстів обчислюється на основі цих ваг. TF-IDF використовується для порівняння текстів і ранжування статей в пошуку наукових інформаційних ресурсів.

TF-IDF - це статистичний показник, який використовується для визначення важливості кожного слова в документі в контексті всього корпусу документів. Після обчислення ваги кожного слова у кожному документі, можемо використовувати ці значення для порівняння текстів. Чим вище значення TF-IDF для конкретного слова у документі, тим важливіше це слово для розуміння змісту документа.

Кластеризація документів – це метод аналізу текстової інформації, що дозволяє групувати схожі документи разом у класи або кластери на підставі їхнього вмісту чи інших властивостей. Цей підхід знаходить широке застосування в областях, де обробка та розуміння великої кількості текстової інформації має ключове значення, таких як інформаційний пошук, аналіз соціальних мереж, або наукові дослідження. Для визначення схожості документів можна використати також методи кластеризації. Першим кроком є визначення мети кластеризації. Наприклад, це може бути групування новинних статей за темами, класифікація наукових статей за галузями чи сферами дослідження, або категоризація користувачських відгуків за темами. Вибір ознак – це значення, які ознаки документів будуть використані для оцінки їхньої схожості. Це може включати в себе використання словникового запасу, синтаксичних структур, ключових слів, або інших лінгвістичних та статистичних ознак. Перетворення текстових документів у векторну форму, що може бути використана алгоритмами кластеризації. Це може бути векторна модель простору слів (word embeddings), TF-IDF вектори, чи інші представлення.

Щоб створити візуалізацію з тексту, необхідна обробка тексту [9] або обробка природної мови для створення якісних або кількісних характеристик тексту [10].

Актуальна візуалізація це здебільшого - аналіз тексту. У більшості випадків аналізується цілий текстовий корпус, а не частина текстів. До текста можна застосувати різні НЛП і методи статистичного аналізу.

Сумка слів і N-грами – це мовні моделі, які використовуються для побудови обчислювального представлення для корпусу.

Інтелектуальний аналіз тексту: методи, онтології та інструменти

- Відображення тематичних (текстуальних) даних
- Діаграми: хмара слів, накладення тексту
- Таблиці: GRIDL, Періодична система
- Графіки: кругова візуалізація, перехресні карти, гліфи
- Геопросторові карти: самоорганізуюча карта (SOM)
- Мережні графіки: мережі спільного використання слів, концептуальні карти, накладання наукових карт, візуалізація дерев

Хмара слів також відома як "тег-хмара" або "словесна хмара" (рис. 1.), є графічним зображенням слів, де частота вживання слова в тексті відображається його розміром чи кольором. Це ефективний інструмент для візуалізації та аналізу частотності вживання слів у тексті. Хмара слів дозволяє швидко отримати уявлення про ключові теми та терміни у тексті. Слова, що найчастіше зустрічаються, будуть більшими і більш помітними. Завдяки хмарі слів можна визначити основні теми, які покриває текст чи набір текстів. Вона дозволяє швидко виявити ключові концепції та ідеї. Великі слова у хмарі можуть вказувати на сильний фокус або емоційне навантаження у тексті. Використання хмари слів в лінгвістиці дозволяє швидко отримувати важливу інформацію про текст та виявляти мовні особливості, полегшуючи аналіз та розуміння лінгвістичних явищ.

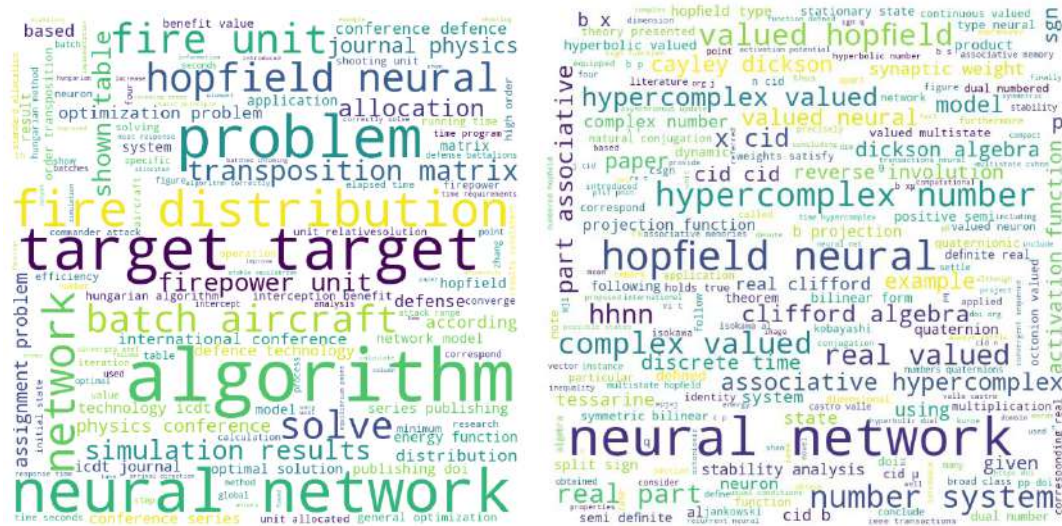


Рис. 1. Приклади хмар слів для цілком оброблених статей

Розробка моделі програмного забезпечення (рис. 2) для аналізу схожості наукових статей може бути важливою для дослідників, академічних установ, а також компаній, що займаються інтелектуальним власництвом. Ось загальна структура такої моделі:

Модуль збору та попередньої обробки даних може містити у собі компонент по збору статей, а саме визначення джерел [11,12], з яких будуть зібрані наукові статті (наприклад, бази даних, журнали, конференції). Крім того може містити компонент попередньої обробка - токенизації, лематизації, видалення стоп-слів, нормалізації реєстру.

Також необхіден модуль векторизації тексту, який буде слугувати основним елементом перетворення текстових даних в числові вектори, враховуючи важливість кожного слова в контексті статті та корпусу статей загалом.

Модуль порівняння схожості може бути побудований на багатьох алгоритмах, деякі з котрих розглянуті вище. Можливе використання косинусного відстані між векторами TF-IDF для визначення схожості між статтями. Окрім того можна запропонувати використання нейронних мереж, таких як Siamese Networks або Transformer-based моделі для визначення схожості.

Модуль візуалізації результатів може включати в себе використання хмари слів для візуалізації ключових термінів у схожих статтях, а також візуалізацію за допомогою створення графіків для відображення ступеня схожості між статтями у вигляді мережі або кластерів.

Модуль оптимізації, що містить у собі застосування зворотного зв'язку, що має враховувати отримані відгуки для постійного вдосконалення моделі. Бажано також мати тюнінг параметрів, тобто оптимізацію параметрів для досягнення кращої продуктивності.

Модуль інтеграції з іншими інструментами та бібліотеками повинен мати API для доступу, тобто забезпечення API для взаємодії з іншими програмами та інструментами. Крім того важлива інтеграція з платформами зберігання статей, а саме взаємодія з платформами, такими як PubMed, Google Scholar, Scopus, Web of Science для автоматичного оновлення бази даних.

Модуль забезпечення безпеки та конфіденційності, який містить у собі такі компоненти, як аутентифікація та авторизація – захист доступу до системи, а також компонент шифрування даних задля захисту конфіденційності зібраних даних.

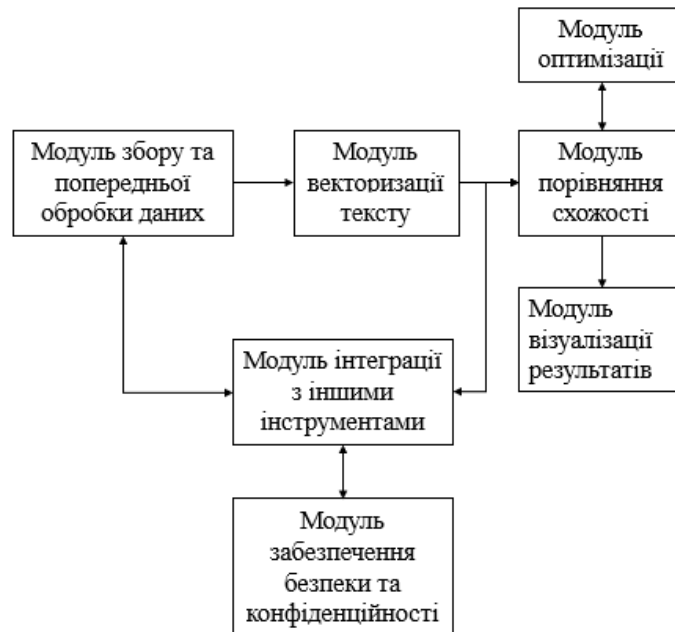


Рис. 2. Дослідницька модель програмного забезпечення для аналізу схожості наукових статей

Практичне застосування алгоритмів аналізу схожості текстів є широким і важливим в різних сферах, включаючи лінгвістику, інформаційний пошук, комп'ютерні науки, аналіз даних і багато інших. Ось кілька сценаріїв застосування:

Аналіз схожості текстів може бути використаний для виявлення плагіату чи копіювання контенту в академічних або веб-текстах. Алгоритми порівнюють структуру та слова у текстах, щоб виявити схожі патерни.

В результаті роботи по кожній із статей можна отримати хмару слів, яка візуально відображає найуживаніші ключові слова, та візуально оцінити їх вагу та кількість у статті, що аналізується (рис. 1.).

Також, у якості результату, розроблений програмний продукт видає дослідникові інформацію, щодо кластерів схожості всіх статей, що приймали участь у дослідженні у двох виглядах: у текстовому вигляді (рис. 3а), та у вигляді двовимірного графіка із означенням центрів кластерів, що були виявлені (рис. 3б.).

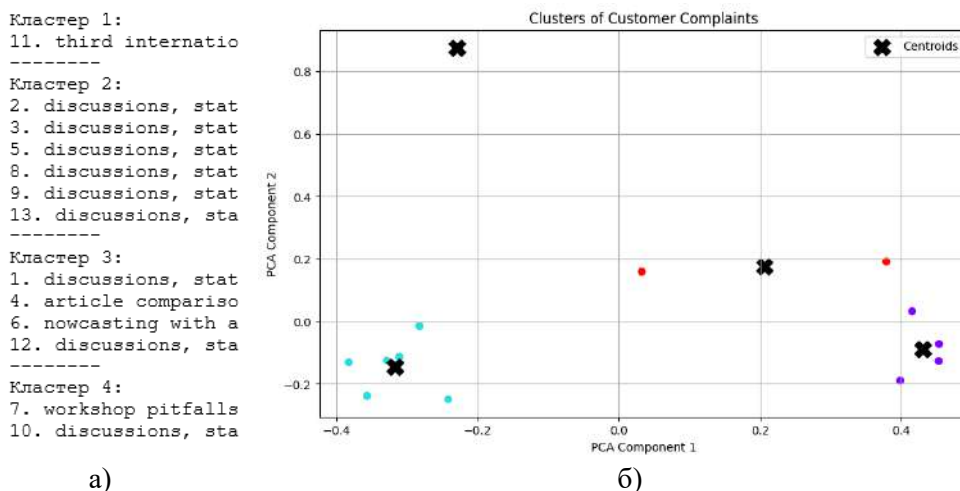


Рис. 3. Розподіл статей по кластерах. а) текстовий б) графічний двовимірний

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У роботі було досліджено та проаналізовано сучасні методи автоматизованого порівняння анотацій наукових статей із

використанням статистичних підходів до обробки природної мови. Запропонована модель програмного забезпечення дозволяє здійснювати ефективний аналіз текстової подібності, що є важливим для наукової комунікації, автоматизованого літературного огляду та виявлення плагіату. Використання таких алгоритмів, як Cosine Similarity, Jaccard Similarity та TF-IDF, у поєднанні з сучасними нейромережевими моделями, зокрема SciBERT та BioBERT, забезпечує високу точність при обробці та класифікації наукових текстів. Отримані результати демонструють, що автоматизовані системи аналізу наукових публікацій можуть значно підвищити швидкість і об'єктивність бібліографічного аналізу, зменшуючи ризик дублювання досліджень та полегшуючи пошук релевантних джерел.

Подальші дослідження у цьому напрямі мають зосередитися на оптимізації існуючих алгоритмів, зокрема на вдосконаленні методів текстового порівняння шляхом поєднання статистичних моделей із сучасними глибинними нейронними мережами. Важливим напрямом є також розширення функціональних можливостей програмного забезпечення, зокрема інтеграція методів семантичного аналізу, які дозволять не лише оцінювати поверхневу подібність текстів, а й глибше розуміти їхній зміст. Додаткової уваги потребує адаптація алгоритмів до міждисциплінарних досліджень, що дасть змогу підвищити якість текстової аналітики в різних наукових сферах.

Перспективним напрямом є розробка механізмів інтеграції з глобальними науковими базами даних, такими як Scopus, Web of Science та Google Scholar, що забезпечить автоматичне оновлення аналізованого корпусу наукових статей. Дослідження візуалізаційних технологій також відкривають нові можливості для представлення результатів аналізу у вигляді інтуїтивно зрозумілих графічних моделей, що сприятиме більш ефективному сприйняттю інформації. Подальше вдосконалення методів автоматизованого аналізу наукових текстів сприятиме розвитку інформаційної екосистеми науки та підвищенню ефективності наукових досліджень.

Список бібліографічного опису:

1. Turrise, R. (2023). *Beyond original Research Articles Categorization via NLP*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2309.07020>.
2. Masoumi, S., Amirkhani, H., Sadeghian, N. et al. Natural language processing (NLP) to facilitate abstract review in medical research: the application of BioBERT to exploring the 20-year use of NLP in medical research. *Syst Rev* 13, 107 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13643-024-02470-y>
3. Timur, Ishankulov., Gleb, Danilov., Konstantin, Kotik., Yu., N., Orlov., Mikhail, Shifrin., Alexander, Potapov. (2022). The Classification of Scientific Abstracts Using Text Statistical Features. *MedInfo*, 290:263-267. doi: 10.3233/SHTI220075
4. Starukhin, Yaroslav & Diukarev, Vladimir. (2024). Automation of text data processing using NLP. *The American Journal of Engineering and Technology*. 6. 24-39. 10.37547/tajet/Volume06Issue07-04.
5. (2022). The Classification of Scientific Abstracts Using Text Statistical Features. doi: 10.3233/shti220075
6. V, G, Dubrovin., Larysa, Deineha., Anastasiya, Yatsenko. (2023). Statistical analysis software. *Electrical Engineering and Power Engineering*, doi: 10.15588/1607-6761-2023-3-3
7. Safoora, Masoumi., Hossein, Amirkhani., Najmeh, Sadeghian., Saeid, Shahrz. (2024). Natural language processing (NLP) to facilitate abstract review in medical research: the application of BioBERT to exploring the 20-year use of NLP in medical research. *Systematic Reviews*, 13 doi: 10.1186/s13643-024-02470-y
8. Ayhan, Arisoy. (2024). Natural language processing algorithms and performance comparison. *Yalvaç akademi dergisi*, doi: 10.57120/yalvac.1536202
9. Marbilia, Possagnolo, Sergio., Talita, de, Souza, Costa., Marcelo, S., de, Paula, Pessoa., Paulo, Sérgio, Martins, Pedro. (2019). A Semantic Approach to Support the Analysis of Abstracts in a Bibliographical Review. 259-264. doi: 10.1109/WETICE.2019.00062
10. Atanassova, Iana & Bertin, Marc & Lariviere, Vincent. (2016). On the Composition of Scientific Abstracts. *Journal of Documentation*. 72. 10.1108/JDOC-09-2015-0111.
11. Sérgio, Eduardo, de, Paiva, Gonçalves., Paulo, Cortez., Sérgio, Moro. (2018). A deep learning approach for sentence classification of scientific abstracts. 479-488. doi: 10.1007/978-3-030-01424-7_47
12. Muhammad, Rizqi, Nur., Gandhi, Surya, Buana., Nur, Aini, Rakhmawati. (2023). Comparative Analysis of Research Article Matching using SIF, RNN, Attention, and Hybrid Methods. 170-175. doi: 10.1109/icts58770.2023.10330854

References:

1. Turrise, R. (2023). *Beyond original Research Articles Categorization via NLP*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2309.07020>.
2. Masoumi, S., Amirkhani, H., Sadeghian, N. et al. Natural language processing (NLP) to facilitate abstract review in medical research: the application of BioBERT to exploring the 20-year use of NLP in medical research. *Syst Rev* 13, 107 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13643-024-02470-y>
3. Timur, Ishankulov., Gleb, Danilov., Konstantin, Kotik., Yu., N., Orlov., Mikhail, Shifrin., Alexander, Potapov. (2022). The Classification of Scientific Abstracts Using Text Statistical Features. *MedInfo*, 290:263-267. doi: 10.3233/SHTI220075

4. Starukhin, Yaroslav & Diukarev, Vladimir. (2024). Automation of text data processing using NLP. *The American Journal of Engineering and Technology*. 6. 24-39. 10.37547/tajet/Volume06Issue07-04.
5. (2022). The Classification of Scientific Abstracts Using Text Statistical Features. doi: 10.3233/shti220075
6. V, G, Dubrovin., Larysa, Deineha., Anastasiya, Yatsenko. (2023). Statistical analysis software. *Electrical Engineering and Power Engineering*, doi: 10.15588/1607-6761-2023-3-3
7. Safoora, Masoumi., Hossein, Amirkhani., Najmeh, Sadeghian., Saeid, Shahraz. (2024). Natural language processing (NLP) to facilitate abstract review in medical research: the application of BioBERT to exploring the 20-year use of NLP in medical research. *Systematic Reviews*, 13 doi: 10.1186/s13643-024-02470-y
8. Ayhan, Arısoy. (2024). Natural language processing algorithms and performance comparison. *Yalvaç akademi dergisi*, doi: 10.57120/yalvac.1536202
9. Marbilía, Possagnolo, Sergio., Talita, de, Souza, Costa., Marcelo, S., de, Paula, Pessoa., Paulo, Sérgio, Martins, Pedro. (2019). A Semantic Approach to Support the Analysis of Abstracts in a Bibliographical Review. 259-264. doi: 10.1109/WETICE.2019.00062
10. Atanassova, Iana & Bertin, Marc & Lariviere, Vincent. (2016). On the Composition of Scientific Abstracts. *Journal of Documentation*. 72. 10.1108/JDOC-09-2015-0111.
11. Sérgio, Eduardo, de, Paiva, Gonçalves., Paulo, Cortez., Sérgio, Moro. (2018). A deep learning approach for sentence classification of scientific abstracts. 479-488. doi: 10.1007/978-3-030-01424-7_47
12. Muhammad, Rizqi, Nur., Gandhi, Surya, Buana., Nur, Aini, Rakhmawati. (2023). Comparative Analysis of Research Article Matching using SIF, RNN, Attention, and Hybrid Methods. 170-175. doi: 10.1109/icts58770.2023.10330854

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-19>

УДК 004.89

П'ятикоп Олена Євгенівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7731-3051>

Шевченко Артем Євгенович, магістр

<https://orcid.org/0009-0007-5574-5148>

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ API У ВЕБДОДАТОК ДЛЯ ЗБИРАННЯ МУЗИЧНИХ ДАНИХ З ВІДКРИТИХ ДЖЕРЕЛ

П'ятикоп О.Є., Шевченко А.Є. Інтеграція API у вебдодаток для збирання музичних даних з відкритих джерел. Популяризація української музики у світі є важливим інструментом збереження культурної ідентичності та формування позитивного іміджу країни. У цій роботі розглядається питання автоматизованого збору та аналізу музичних даних українських виконавців із використанням Spotify API. Розроблено вебдодаток на основі фреймворку Remix та мови TypeScript, що дозволяє здійснювати авторизацію, отримувати інформацію про композиції, виконавців та альбоми, а також зберігати їх у зручному форматі для подальшої обробки. У межах дослідження було сформовано вибірку, що включає 1,106 записів про композиції від 568 унікальних виконавців, із зазначенням 12 музичних характеристик та жанрової приналежності. Аналіз зібраних даних показав, що жанрова класифікація вибірки потребує покращення, оскільки Spotify класифікував не всі композиції. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу жанрової класифікації української музики, оптимізації рекомендаційних систем та популяризації україномовного контенту у міжнародному музичному просторі.

Ключові слова: українська музика, Spotify API, веб-застосунок, жанрова класифікація, аудіо, автоматизований збір даних

Piatyko O., Shevchenko A. Integrating API into Web Application for Collecting Music Data from Open Sources. Popularization of Ukrainian music in the world is an important tool for preserving the cultural identity and positive image of the country. This paper considers the issue of automated collection and analysis of musical data of Ukrainian performers using the Spotify API. A web application based on the Remix framework and the TypeScript language has been developed, which allows for authorization, obtaining information about compositions, performers and albums, and storing them in a convenient format for further processing. As part of the study, a sample featuring 1,106 composition records and 568 unique performers was formed, containing 12 musical characteristics and genre labels. Analysis of the collected data showed that the genre classification of the sample needs to be improved, since Spotify did not classify all compositions correctly. The obtained results can be used for further analysis of the genre classification of Ukrainian music, optimization of recommendation systems and popularization of Ukrainian-language content in the international music space.

Keywords: Ukrainian music, Spotify API, web application, genre classification, audio, automated data collection

Постановка проблеми. Популяризація україномовної музики у світі має надзвичайно важливе значення, оскільки вона сприяє збереженню й поширенню української культурної ідентичності на глобальному рівні [1]. Завдяки музиці, яка є універсальною мовою емоцій, Україна може представити свою багату історію, традиції та сучасну творчість світовій спільноті. Це також допомагає руйнувати стереотипи, формувати позитивний імідж країни та відкривати її культурний потенціал для нових аудиторій.

Зазвичай люди слухають музику за своїми сподобаннями, які в тому числі визначаються напрямками жанрів. На сьогодні поширеним є використання різних вбудованих рекомендаційних систем для надання пропозицій користувачам за їх інтересами. Для створення оптимальних рекомендацій необхідно мати класифікацію, що збігається із людськими вподобаннями. Тому для поширення української музики у всесвітньому просторі варто її класифікувати за визначеними жанрами. Для вирішення цієї задачі необхідно мати реальну сучасну вибірку української музики. Зібрати такі дані можна з відкритих джерел. Оскільки обсяг даних повинен бути якомога більшим, то збирання даних варто автоматизувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Насьогодні накопичено багато інформації, в тому числі у відкритих джерелах. Першим кроком до будь-якого процесу аналізу даних є збір даних. Тому зростає потреба у більш складному підході до збору, очищення та обробки даних, а також автоматизації цього процесу [2]. Тому питанням збирання даних опікується багато дослідників з різною метою: для досліджень в галузі охорони здоров'я [3], для вилучення та керування даними публікацій [4], для соціальних досліджень [5-6], а також для аналізу аудіо та музики в Інтернеті [7]. Поширеним для збирання даних є використання вебзастосунків [8-11]. Деякі автори пропонують збирати інформацію в просторі Інтернет за допомогою інструментів прийому та обробки даних

через форми [8-9]. Але більш ефективними методами є автоматизовані підходи через вебскрейпінг та використання інтерфейсу прикладного програмування – Application Programming Interface (API) [10-11].

Автори роботи [10] детально дослідили ці засоби та прийшли висновку, що за допомогою API можна швидше та надійніше організувати доступ до структурованих даних в порівнянні зі вебскрейпінгом. Також завдяки API-запитам можна безпосередньо отримувати необхідну інформацію у компактному форматі (зазвичай JSON), яка зручна для подальшої обробки та аналізу даних. Робота [11] також присвячена питанням використання веб-API відкритих даних. Автори вважають, що удосконалення документації веб-API відкритих даних підвищить ефективність їх подальшого використання.

В статті [12] автори пропонують власне веб-програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, яке систематизує зберігання, керування, анування, аналіз і обмін лінгвістичними даними, зібраними на місцях, а також зібраними з різних джерел в Інтернеті. Запропонована система управління та аналізу лінгвістичних даних дозволяє експортувати дані в різні формати, включаючи CSV, TSV, JSON, XLSX.

Грунтовне дослідження щодо інтеграції API та організаційної гнучкості на цифрових музичних платформах провели в роботі [13]. Дослідження цих авторів продемонструвало трансформаційну роль API у цифровій музичній платформі. Автори в своїй роботі роблять висновок, що інтеграція API впливає на гнучкість організації за таких умов, як наявність можливостей і управління напругою під час процесу інтеграції.

В роботі [14] також вважають, що організація збирання даних через API є доцільною. Автори пропонують власну веб-програму Spotiveu для спрощеного використання програмного інтерфейсу програми Spotify в дослідженнях щодо музичних вподобань слухачів. Стрімінговий сервіс потокового аудіо Spotify досліджується не лише в цій роботі.

На основі даних постачальника потокового аудіо та медіа-послуг Spotify проводиться багато досліджень. Так в роботі [15] автори аналізують рейтинг найкращих подкастів Spotify у Португалії. Завдяки даним Spotify автори вивчають, як сприяють відкриттю та наскільки різноманітним є контент, який надається користувачам. В роботі [16] автори вивчають користувацький досвід на Spotify, різноманітність та узгодженість набору пісень, які користувач слухає. На основі накопичених мільйонів пісень та поведінки прослуховування на Spotify автори визначають наскільки музично різноманітний кожен користувач. Також в роботі намагаються виявити чи висока різноманітність споживання. Експеримент цих авторів показав, що алгоритмічні рекомендації ефективніші для користувачів із меншою різноманітністю.

Також вивченню динаміки популярності музики Spotify та прогнозуванню за допомогою машинного навчання присвячена робота [17]. Щоб отримати глибше розуміння музичних уподобань і моделей поведінки користувачів Spotify в роботі [17] проводиться ретельний аналіз і досліджується взаємозв'язок між музичними функціями та поведінкою користувачів. Робота направлена на збір даних про прослуховування музики користувачів Spotify та аналіз різних музичних характеристик такі як енергія, танцювальність, валентність і удари за хвилину (BPM). На основі цього далі автори використали дві моделі машинного навчання Дерева рішень і Випадкові ліси для моделювання та аналізу даних поведінки користувачів Spotify. Автори виявили пісні з високою енергією, танцювальністю та валентністю, як правило, більш популярні серед користувачів. Також аналізом музичних даних займалися науковці роботи [18]. Автори проводили прогнозування аудіофункцій Spotify за тегами Last.fm. Автори вважають, що зіставлення доріжок між Last.fm і Spotify – це ще одна можливість для дослідження та вдосконалення.

Таким чином, аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що аналіз музичних даних, їх звукових характеристик, пошук закономірностей та дослідження вподобань користувачів є досить актуальною задачею. Для вирішення цієї задачі необхідне збирання даних, яке частіше проводять за допомогою вебінструментів. Поширеним та ефективним підходом для реалізації цієї задачі є створення вебдодатку з використанням необхідного інтерфейсу прикладного програмування.

Мета дослідження. Інтеграція API у вебдодаток для збирання українських музичних даних з музичного стрімінгового сервісу Spotify.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Процес збору даних про українську музику відбувався за допомогою API платформи Spotify, що надає можливість отримувати дані про музичні конкретних композицій. Було вирішено створити

простий веб-додаток, в якому буде можливість авторизуватись із власним акаунтом Spotify та переглянути і завантажити дані про пісні.

Платформа Spotify разом зі своїми кураторами регулярно створює добірки пісень. Це можуть бути як присвячені найпопулярнішим за рік, так і трендовим на окремий проміжок часу пісням. Було обрано 20 добірок, з яких 5 присвячені кращим пісням за 2019-2023 роки, 8 – найпопулярнішим за 2023 рік, залишок – найпопулярнішим за проміжок часу 2023-го року. Такий розподіл дозволить створити ширшу вибірку з більшою кількістю жанрів.

Створення застосунку було реалізовано за допомогою фреймворк Remix та мова програмування TypeScript. Вибір фреймворку дозволяє полегшити розробку за зберігати серверний та клієнтський код у одній кодовій базі. Додаток запускатиметься за допомогою локального серверу vite.

Для авторизації пропонується два варіанти – для застосунків із сервером та без. Для серверних застосунків генерується секретний ключ додатку, який використовується для отримання токена автентифікації та токена оновлення. Додатково зазначається обсяг дозволів, що надаються застосунку, наприклад, до профіля або добірок користувача. Таким чином, використання токенів дозволяє авторизуватись один раз, а далі сервер буде автоматично їх оновлювати.

Для створення запитів до Spotify API було створено HTTP-клієнт з декількома перехоплювачами для додавання необхідних заголовків авторизації. Архітектура додатку показана на рисунку 1.

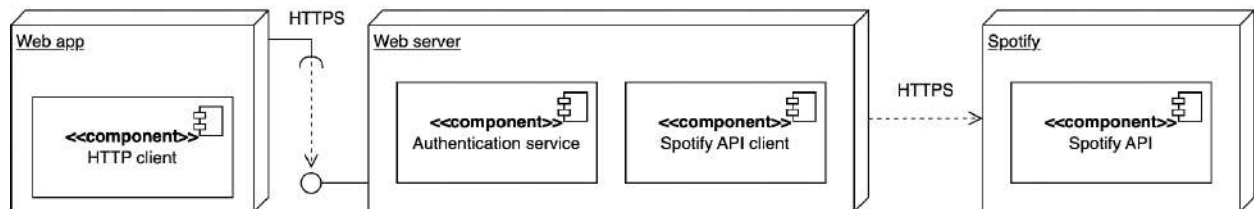
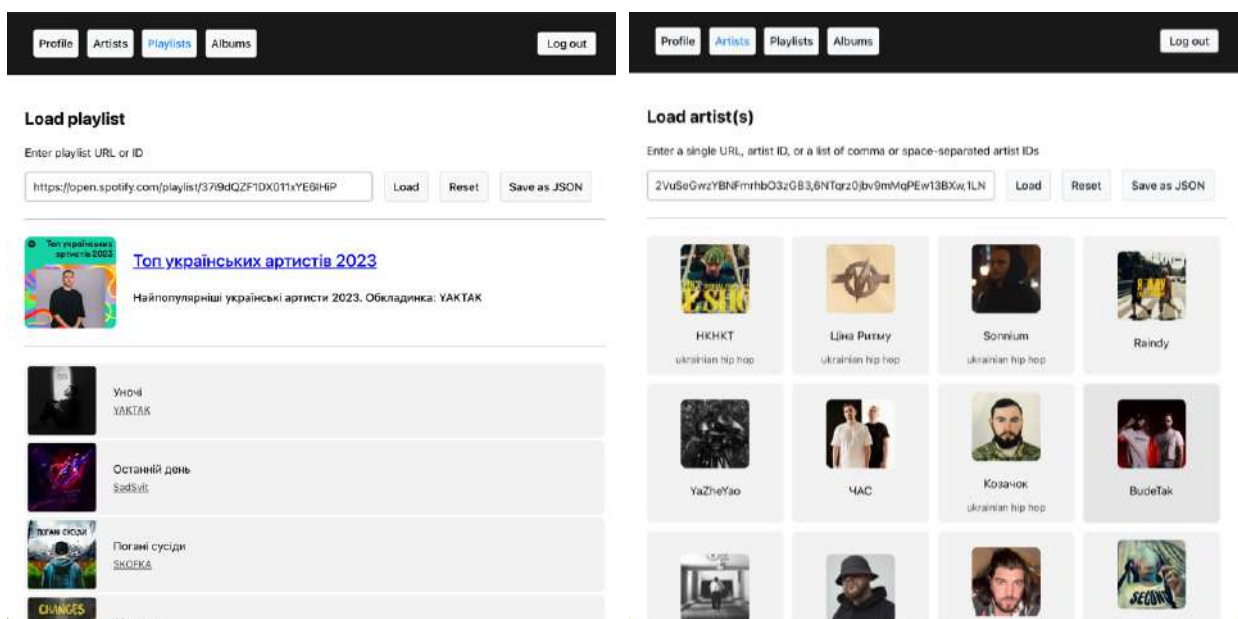


Рис. 1 – Архітектура вебзастосунку

Реалізовані методи для отримання інформації про альбоми, виконавців, добірки та музичні характеристики пісень. За допомогою запитів до музичних характеристик конкретної композиції можна отримати 12 характеристик. Запити до даних про композиції дозволяють отримати дані про виконавця та альбом, а також назву та зображення обкладинки.

При завантаженні даних добірки пісень окрім запитів про інформацію про неї додатково надсилаються запити для отримання характеристик кожної пісні. Після цього ці дані поєднуються у єдиний об'єкт, який пізніше можна завантажити у форматі JSON. На рисунку 2 показано дві сторінки веб-додатку із завантаженими даними.



а) – сторінка списку відтворення

б) – сторінка виконавців

Рис. 2 – Інтерфейс користувача веб-програми:

Таким чином, було завантажено дані обраних добірок у форматі JSON. Далі було проведено їх трансформацію за допомогою скрипту, що написаний на мові Python та виконується за допомогою інструменту Jupyter Notebook. Він виконує такі операції:

- імпорт JSON-файл кожної добірки у форматі таблиці DataFrame;
- видалення з таблиць добірок зайві поля, наприклад, зовнішні ключі та посилання на зображення;
- збір унікальних ідентифікаторів альбомів та виконавців з усіх добірок та збереження їх у форматі CSV в два окремі файли;
- збереження кожної добірки у форматі CSV для подальшої роботи.

Оскільки платформа Spotify визначає музичні жанри лише для виконавців, а не для окремих пісень, знадобилося провести додатковий етап завантаження даних про усіх виконавців добірок. Унікальні ідентифікатори виконавців, отримані при роботі скрипту, було використано для завантаження даних виконавців за допомогою веб-додатку. Скрипт був розширений такими операціями:

- імпортування JSON-файлів даних про виконавців у форматі таблиці DataFrame;
- очистка даних про виконавців від зайвих полів;
- додавання даних про виконавця у таблицю добірок на основі його ідентифікатора.

Таким чином, розроблений скрипт реалізував складну логіку завантаження JSON-файлів у пам'ять, очистки даних від зайвих полів, збереження даних у іншому форматі та співставлення інформації з різних джерел на основі унікальних ідентифікаторів виконавців.

Об'єднана вибірка з даними про виконавців та композиції включає в себе 21 атрибут: ідентифікатори пісні, виконавця та альбому, рік та дату виходу, тривалість, назву композиції та виконавця, параметр популярності та 12 музичних характеристик: танцювальність (danceability), енергійність (energy), відносну гучність (loudness), музичний лад (mode), розмовність (speechiness), акустичність (acousticness), інструментальність (instrumentalness), живість (liveness), музичну позитивність (valence), кількість ударів на хвилину (tempo), тональність (key) та тактовий розмір (time signature). Всього у сформованій вибірці міститься 1,106 записів про композиції, що входять у 1,057 альбомів від 568 унікальних виконавців.

У вибірку увійшли 193 унікальних жанри, які не є жанрами у загальноприйнятому розумінні. До багатьох з них додаються модифікатори, наприклад, країни чи міста походження, Ukrainian, Romanian тощо. Також існують жанри, що не є такими у класичному розумінні, наприклад, weirdcore чи zoomergaze. Після фільтрації таких жанрів кількість реальних жанрів склала всього 63, деякі з яких є комбінаціями двох широкоживаних – наприклад, «pop EDM».

Також виявилось, що менш популярні виконавці або такі, що не мають достатньої кількості композицій, ще не були класифіковані на жанри платформою. З 1106 записів лише 896 мають присвоєні істинні мітки класів. Тому наступним етапом роботи буде обробка отриманої вибірки перед подальшим аналізом та класифікацією.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

У результаті дослідження було створено веб-додаток на основі фреймворку Remix та мови TypeScript для автоматизованого збору даних про українську музику з платформи Spotify через API. Реалізовано механізм авторизації користувачів, надсилання запитів до API, отримання інформації про альбоми, виконавців, добірки та музичні характеристики пісень. Зібрані дані були збережені у форматі JSON, а їхня подальша обробка здійснювалася за допомогою Python та Jupyter Notebook.

Формування вибірки базувалося на аналізі 20 офіційних добірок Spotify, що охоплювали популярні та трендові композиції за останні роки. У підсумку отримано 1,106 унікальних записів про пісні, що належать до 1,057 альбомів від 568 унікальних виконавців. Було зібрано 12 музичних характеристик кожної композиції, а також визначено рівень її популярності.

Аналіз отриманих даних виявив певні проблеми, зокрема відсутність визначення жанру на рівні окремих композицій, що ускладнює подальшу автоматичну класифікацію. Це потребує подальших додаткових етапів обробки даних для покращення точності жанрової атрибуції.

Отримані результати демонструють доцільність використання API для збору музичних даних, проте вказують на необхідність додаткової обробки для коректної жанрової класифікації. Подальші дослідження будуть зосереджені на покращенні класифікації жанрів та використанні методів машинного навчання для автоматичної категоризації українських музичних композицій.

Список бібліографічного опису

1. Hodgson T. Spotify and the democratisation of music. *Popular Music*. 2021;40(1):1-17. doi:10.1017/S0261143021000064
2. Gopal A., Ramanathan K., Automating data collection process in industry 4.0: A user case study. *AIP Conference Proceedings*. (2022). 2519. 030027. 10.1063/5.0109812.
3. Benítez-Andrades J., Labra Gayo J., Quiroga E., Martín V., García I., Marqués-Sánchez P., Benavides C., A Web-Based Tool for Automatic Data Collection, Curation, and Visualization of Complex Healthcare Survey Studies including Social Network Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2017. 10.1155/2017/2579848.
4. Sulistya, Y., Wardhana, A. C., Istighosah, M., & Riyandi, A. (2024). Automated Google Scholar Crawling with a Web-Based Tool for Publication Data Management. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 6(4), 768-773. <https://doi.org/10.47233/jteksis.v6i4.1604>
5. Smalheiser NR, Holt AW. A web-based tool for automatically linking clinical trials to their publications. *J Am Med Inform Assoc*. 2022 Apr 13; 29(5): 822-830. doi: 10.1093/jamia/ocab290.
6. Radke, Markus & Lepa, Steffen & Ladleif, Matthias. (2023). Spotivey: A web application for simplified use of the Spotify application programming interface in online questionnaire studies. *Mobile Media & Communication*. 12. 441-445. 10.1177/20501579231220857.
7. Correya, A., Marcos-Fernández, J., Joglar-Ongay, L., Alonso-Jiménez, P., Serra, X. and Bogdanov, D. Audio and Music Analysis on the Web using Essentia.js, *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval*, 4(1), p. 167–181. (2021). Available at: <https://doi.org/10.5334/tismir.111>.
8. Šprem Š, Tomažin N, Matečić J, Horvat M. Building Advanced Web Applications Using Data Ingestion and Data Processing Tools. *Electronics*. 2024; 13(4):709. <https://doi.org/10.3390/electronics13040709>
9. Cooper C., Cooper S., del Junco García J., Shipp E., Whitworth R., Cooper S. Web-based data collection: Detailed methods of a questionnaire and data gathering tool. *Epidemiologic perspectives & innovations: EP+I*. 3. 1. (2006). 10.1186/1742-5573-3-1.
10. Дзєндзя А. А., Левус С. В., Вовк А. С. Аналіз ефективного застосування методів автоматизованого збирання даних з вебсайтів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2024, т. 34, № 7. ст. 128-136. 10.36930/40340716.
11. González-Mora C., Barros C., Garrigós I., Zubcoff J., Lloret E., Mazón J.-N., Improving open data web API documentation through interactivity and natural language generation, *Computer Standards & Interfaces*, V. 83, 2023, 103657, <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103657>.
12. Singh S., Ratan S., Mathur N., Kumar R. An Open-source Web-based Application for Development of Resources and Technologies in Underresourced Languages. In *Proceedings of the 3rd Workshop for Natural Language Processing Open Source Software (NLP-OSS 2023)*, 2023p 120–129, Singapore. Association for Computational Linguistics. 10.18653/v1/2023.nlposs-1.14
13. Ofoeda J., Boateng R., Effah J., API integration and organisational agility outcomes in digital music platforms: A qualitative case study, *Heliyon*, Volume 10, Issue 11, 2024, e31756, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31756>.
14. Radke M., Lepa S., Ladleif M. Spotivey: A web application for simplified use of the Spotify application programming interface in online questionnaire studies. *Mobile Media & Communication*. (2023). 12. 441-445. 10.1177/20501579231220857.
15. Paisana, M., Cardoso, G., Couraceiro, P. Platforms as audio discovery ecosystems: What Spotify's podcast rankings tell us about the way platforms appropriate the format. *Communication & Society*, (2024). 37(4), 91-106. <https://doi.org/10.15581/003.37.4.91-106>
16. Anderson A., Maystre L., Anderson I. Mehrotra R. Lalmas M..Algorithmic Effects on the Diversity of Consumption on Spotify. In *Proceedings of The Web Conference 2020 (WWW '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2155–2165. <https://doi.org/10.1145/3366423.3380281>
17. Shu Miaomiao. Exploring Spotify's Music Popularity Dynamics and Forecasting with Machine Learning. *Theoretical and Natural Science*. 2024. 53. 83-89. 10.54254/2753-8818/53/20240147.
18. Jaime Ramírez Castillo, M. Julia Flores, Philippe Leray. Predicting spotify audio features from Last.fm tags. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 10.1007/s11042-023-17160-5.

References

19. Hodgson T. Spotify and the democratisation of music. *Popular Music*. 2021;40(1):1-17. doi:10.1017/S0261143021000064
20. Gopal A., Ramanathan K., Automating data collection process in industry 4.0: A user case study. *AIP Conference Proceedings*. (2022). 2519. 030027. 10.1063/5.0109812.
21. Benítez-Andrades J., Labra Gayo J., Quiroga E., Martín V., García I., Marqués-Sánchez P., Benavides C., A Web-Based Tool for Automatic Data Collection, Curation, and Visualization of Complex Healthcare Survey Studies including Social Network Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*. 2017. 10.1155/2017/2579848.
22. Sulistya, Y., Wardhana, A. C., Istighosah, M., & Riyandi, A. (2024). Automated Google Scholar Crawling with a Web-Based Tool for Publication Data Management. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, 6(4), 768-773. <https://doi.org/10.47233/jteksis.v6i4.1604>
23. Smalheiser NR, Holt AW. A web-based tool for automatically linking clinical trials to their publications. *J Am Med Inform Assoc*. 2022 Apr 13;29(5):822-830. doi: 10.1093/jamia/ocab290.
24. Radke, Markus & Lepa, Steffen & Ladleif, Matthias. (2023). Spotivey: A web application for simplified use of the Spotify application programming interface in online questionnaire studies. *Mobile Media & Communication*. 12. 441-445. 10.1177/20501579231220857.
25. Correya, A., Marcos-Fernández, J., Joglar-Ongay, L., Alonso-Jiménez, P., Serra, X. and Bogdanov, D. Audio and Music Analysis on the Web using Essentia.js, *Transactions of the International Society for Music Information Retrieval*, 4(1), p. 167–181. (2021). Available at: <https://doi.org/10.5334/tismir.111>.

26. Šprem Š, Tomažin N, Matečić J, Horvat M. Building Advanced Web Applications Using Data Ingestion and Data Processing Tools. *Electronics*. 2024; 13(4):709. <https://doi.org/10.3390/electronics13040709>
27. Cooper C., Cooper S., del Junco García J., Shipp E., Whitworth R., Cooper S. Web-based data collection: Detailed methods of a questionnaire and data gathering tool. *Epidemiologic perspectives & innovations: EP+I*. 3. 1. (2006). 10.1186/1742-5573-3-1.
28. Dzendzia, A. A., Levus, Ye. V., & Vovk, A. S. (2024). Analysis of the effective use of the methods of automated data collection from websites. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2024, Vol. 34, no 7. cr. 128-136. 10.36930/40340716.
29. González-Mora C., Barros C., Garrigós I., Zubcoff J., Lloret E., Mazón J.-N., Improving open data web API documentation through interactivity and natural language generation, *Computer Standards & Interfaces*, V. 83, 2023, 103657, <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103657>.
30. Singh S., Ratan S., Mathur N., Kumar R. An Open-source Web-based Application for Development of Resources and Technologies in Underresourced Languages. In *Proceedings of the 3rd Workshop for Natural Language Processing Open Source Software (NLP-OSS 2023)*, 2023p 120–129, Singapore. Association for Computational Linguistics. 10.18653/v1/2023.nlposs-1.14
31. Ofoeda J., Boateng R., Effah J., API integration and organisational agility outcomes in digital music platforms: A qualitative case study, *Heliyon*, Volume 10, Issue 11, 2024, e31756, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31756>.
32. Radke M., Lepa S., Ladleif M. Spotivey: A web application for simplified use of the Spotify application programming interface in online questionnaire studies. *Mobile Media & Communication*. (2023). 12. 441-445. 10.1177/20501579231220857.
33. Paisana, M., Cardoso, G., Couraceiro, P. Platforms as audio discovery ecosystems: What Spotify's podcast rankings tell us about the way platforms appropriate the format. *Communication & Society*, (2024). 37(4), 91-106. <https://doi.org/10.15581/003.37.4.91-106>
34. Anderson A., Maystre L., Anderson I. Mehrotra R. Lalmas M..Algorithmic Effects on the Diversity of Consumption on Spotify. In *Proceedings of The Web Conference 2020 (WWW '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2155–2165. <https://doi.org/10.1145/3366423.3380281>
35. Shu Miaomiao. Exploring Spotify's Music Popularity Dynamics and Forecasting with Machine Learning. *Theoretical and Natural Science*. 2024. 53. 83-89. 10.54254/2753-8818/53/20240147.
36. Jaime Ramírez Castillo, M. Julia Flores, Philippe Leray. Predicting spotify audio features from Last.fm tags. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 10.1007/s11042-023-17160-5.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-20>

УДК 004.89

Проніна Ольга Ігорівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-7085-8027>

Рейжевський Михайло Ігорович, магістр

<https://orcid.org/0009-0006-8212-0111>

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, Україна

ПРОГРАМУВАННЯ ІГРОВОГО ДОДАТКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Проніна О.І., Рейжевський М.І. Програмування ігрового додатку з використанням штучного інтелекту. Стаття присвячена важливості розвитку відеоігор у сучасному суспільстві та ролі штучного інтелекту в цій сфері. Розглянуто внесок відеоігор у культуру, економіку та технологічний прогрес, а також їхній вплив на популяризацію національної спадщини. Описано застосування штучного інтелекту у створенні ігрових механік, генерації текстур, анімації та розвитку NPC (неігрових персонажів), що забезпечує більш реалістичний ігровий досвід. Висвітлено використання Reinforcement Learning і алгоритму Proximal Policy Optimization для навчання NPC, що оптимізує процес розробки та покращує поведінку персонажів. У статті наведено переваги впровадження штучного інтелекту у відеоігри, які роблять їх складнішими, динамічнішими та більш інтерактивними.

Ключові слова: відеоігри, штучний інтелект, ігрові механіки, NPC, reinforcement learning, proximal policy optimization

Pronina O., Reizhevskiy M. Programming A Game Application Using Artificial Intelligence The article is devoted to the importance of the development of video games in modern society and the role of artificial intelligence in this area. The contribution of video games to culture, economy and technological progress is considered, as well as their impact on the popularization of national heritage. The application of artificial intelligence in the creation of game mechanics, texture generation, animation and development of NPCs (non-player characters) is described, which provides a more realistic gaming experience. The use of Reinforcement Learning and the Proximal Policy Optimization algorithm for NPC training is highlighted, which optimizes the development process and improves the behavior of characters. The article presents the advantages of implementing artificial intelligence in video games, which make them more complex, dynamic and more interactive.

Keywords: video games, artificial intelligence, game mechanics, NPC, reinforcement learning, proximal policy optimization.

Важливість розвитку відеоігор в суспільстві. На сьогодні відеоігри стали невід'ємною частиною нашого життя, економіки, культури. Гарним прикладом є відома гра, S.T.A.L.K.E.R. 2: Heart of Chernobyl від українських розробників, яка містить в собі понад 400 українських пісень, та просуває їх у інші країни. Що розширює популярність та впізнаваність української культури. Відеоігри залучають сотні мільйонів гравців, генеруючи сотні мільйонів та мільярди доходів у рік. Тільки в США середньостатистичний гравець витрачає понад 450 доларів кожні 3 місяця, а сумарно відеоігрова індустрія принесла понад 57 мільярдів доходу за рік, що набагато більше ніж кіно, музика та інші індустрії [1].

Згідно з даними, понад 62% ігрових студій використовують штучний інтелект (ШІ) у своїй роботі, що свідчить про зростаючу популярність та важливість цієї технології в індустрії [2]. Штучний інтелект активно застосовується в різних аспектах розробки відеоігор таких як, прототипування та розробка концептів що дозволяє розробникам ефективніше тестувати та вдосконалювати ігрові механіки. Завдяки штучному інтелекту можна автоматизувати процеси генерації текстур, моделей та інших елементів, що значно прискорює розробку та знижує витрати часу. Анімація та озвучення: ШІ використовується для створення реалістичних анімацій та озвучення персонажів, що підвищує якість ігрового процесу. Наприклад, у грі «High on Life» технологія Midjourney AI була використана для генерації унікальних текстур, що додало сюрреалістичної атмосфери світу гри [3].

Штучний інтелект також активно застосовується для покращення поведінки не ігрових персонажів (NPC) а саме. Штучний інтелект дозволяє NPC адаптуватися до дій гравця, реагувати на зміни в ігровому середовищі та приймати складні рішення, що робить взаємодію з ними більш природною та цікавою. Завдяки штучному інтелекту NPC можуть вести більш складні та динамічні діалоги з гравцем, що збагачує сюжет та підвищує занурення в гру.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [4] описано роль ШІ у відеоіграх, зокрема його вплив на ігровий процес, NPC, адаптацію гри, процедурну генерацію та моделювання досвіду. Розглядаються машинне навчання й нейромережі, що персоналізують гру, аналізують гравців і покращують графіку та звук.

У тексті статті [5] розглядається історія та вплив технологій, зокрема ШІ, на розробку відеоігор. Згадується гра Tennis for Two (1950) як початок технологічних ігрових експериментів. ШІ революціонізував індустрію, додаючи інноваційні функції та покращуючи взаємодію гравців із персонажами й сюжетами. Аналізується роль сучасних технологій у геймдизайні, історія ШІ в іграх та його подальший розвиток.

У роботі [6] розглядається вплив ШІ на розвиток відеоігор, зокрема покращення візуальних аспектів, оптимізацію геймплею та створення реалістичних середовищ. Аналізується застосування машинного навчання для анімації, рельєфу та світлових ефектів за методологією PRISMA. Обговорюються переваги, виклики та етичні аспекти впровадження ШІ у відеоіграх.

У тексті роботи [7] розглядається роль штучного інтелекту в ігровій індустрії, зокрема його вплив на розробку, оптимізацію ігрового процесу та покращення користувацького досвіду. Описуються алгоритми ШІ, які застосовуються для вдосконалення різних аспектів ігор, таких як взаємодія гравців із ігровими елементами та загальна оптимізація контенту. У статті аналізуються поточні досягнення в цій сфері та прогнозується майбутній розвиток ШІ, включаючи його інтеграцію в етапи дизайну ігор та розробку. Окремо розглядаються можливості покращення апаратного забезпечення для підтримки більш складних моделей ШІ. Завершується текст обговоренням перспектив розвитку ігрової індустрії завдяки застосуванню ШІ, підкреслюючи потенційні досягнення та переваги для створення більш захоплюючих і персоналізованих ігрових середовищ.

У статті [8] розглядається застосування штучного інтелекту (ШІ) в розробці відеоігор, зокрема його роль у моделюванні поведінки неігрових персонажів (NPC) через алгоритми прийняття рішень. Також обговорюється використання ШІ для процедурної генерації контенту, такого як дизайн рівнів чи місії, що сприяє різноманітності ігрового процесу. Основна увага в статті приділяється застосуванню ШІ для покращення реалістичності фізики та руху в іграх, а також динамічній адаптації контенту. Вона надає всеосяжний огляд поточного стану використання ШІ в індустрії, підкреслюючи важливість цієї технології, а також прогнозує її подальший розвиток.

У [9] статті представлено огляд використання штучного інтелекту (ШІ) у розробці серйозних ігор. Описано європейський проект, який пропонує набір передових компонентів ШІ для ігор, що включають педагогічні можливості та можуть бути легко використані на різних ігрових платформах і в ігрових движках.

У статті [10] йдеться про дослідження, які аналізують застосування ШІ в дизайні та розробці ігор. Розглядаються типи машинного навчання (контрольоване, неконтрольоване, підкріплення) та методи глибокого навчання (CNN, RNN, GAN). Описано використання ШІ для процедурної генерації контенту, балансування гри, управління NPC, тестування та персоналізації. Наведено приклади AlphaGo, StarCraft II та OpenAI Five. Також обговорюються безпека, конфіденційність і етика у сфері ШІ в іграх.

Ця [11] стаття розглядає вплив автономних інтелектуальних інструментів на проектну роботу, зокрема на інноваційний дизайн. Такі інструменти здатні генерувати складні та оригінальні результати з мінімальним або нульовим втручанням користувача, що змінює традиційні підходи до проектування та впровадження інновацій. У статті пропонується концептуальна основа для аналізу впливу цих інструментів на процес проектування. Спочатку автори концептуалізація автономні інструменти як «раціональних» агентів, які можуть брати участь у проектуванні. Вони показують, що ці агенти можуть працювати за двома підходами: символічним і конекціоністський, які відрізняються підходами до обробки інформації. Далі застосовується теорія управління, щоб проаналізувати взаємозв'язки між автономними інструментами, людьми, які беруть участь у проектуванні, та середовищем, у якому ці інструменти функціонують. Такий підхід дозволяє вивчати автономні інструменти проектування як новий тип агентства в організаційному контексті. Як приклади цього підходу в статті наводиться розробка відеоігри Ubisoft Ghost Recon Wildlands, що використовувала такі інструменти для проектування. Завершення статті містить орієнтовну програму досліджень для подальшого вивчення автономних інструментів проектування, щоб краще зрозуміти їхні впливи та можливості в інноваційному процесі.

Мета дослідження. Виявлення ефективних характеристик комп'ютера, для проектування та розробки NPC з використанням штучного інтелекту під час розробки відеоігор.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для розробки гри, був обраний один з самих популярних жанрів (ММО – massively multiplayer online

game), де користувачі дуже часто взаємодіють з не ігровими персонажами, якими наповнений ігровий світ. NPC являються однією з механік ігри яка дозволяє користувачам не відчувати себе самотньо, також NPC дають можливість користувачу отримувати завдання, корисну інформацію, спорядження чи будь що інше на думку розробника.

Основною локацією є невелике місто з будинками селян, кузнею та ринком. Користувач може торгувати з даними NPC (селянами), також отримати початкові завдання від Коваля для освоєння механік збору ресурсів та виготовлення речей.

Саме додавання NPC, дає можливість ввести механіки спілкування з ними, торгівлі, отримання завдань, як побічних так і головних, які будуть розкривати сюжет або починати нові невеличкі історії. На рисунку 1 зображено прототип головної локації.

В Unity розробники можуть використовувати ML-Agents Toolkit, що дозволяє інтегрувати машинне навчання (у тому числі RL) в ігрові проекти. ML-Agents надає інструменти для тренування NPC, що дозволяє їм взаємодіяти з ігровим середовищем і навчатися через взаємодію, використовуючи нейронні мережі [12].

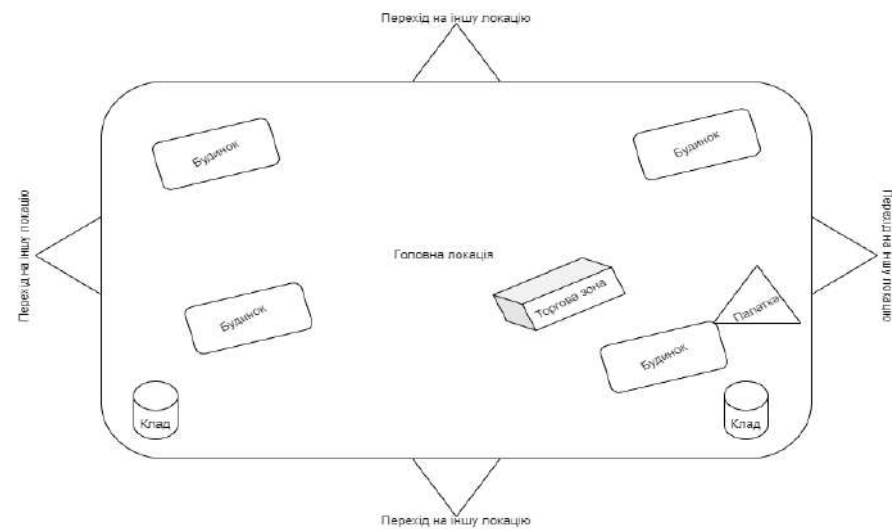


Рис. 1 – Прототип центральної локації

Поговоривши з не ігровим персонажем (Коваль), користувач, в діалозі з ним отримує побічне завдання по збору корисних копалин. Після збору їх і поверненню до коваля, користувач відає йому зібрані матеріали, за що отримує винагороду. Данна механіка спонукає користувача, розмовляти з NPC, отримувати завдання, проходити їх побічні історії щоб отримувати нагороди. Під час цього, гравець несвідомо захоплюється ігровим світом, його історією та тими хто у ньому проживає. Чим краще буде прописаний та зроблений ігровий світ тим більш ймовірно він затягне гравця. Бо на сьогодні ігри вже важко відрізнити від кіно чи книг, через неймовірно деталізовану красу та наповненість. Кожен не ігровий персонаж має свою історію, живе своїм життям, та відіграє, не завжди велику, але все таки значну частку в історії. І щоб зробити такого персонажа, на допомогу розробнику приходять штучний інтелект.

Розробляти та прописувати кожен крок і діалог для кожного NPC, було би дуже великою витратою часу та ресурсу. Але і відмовлятися від них не можна. Чим краще розроблений та навчений штучний інтелект, тим краще буде NPC, прикладом є нова технологія NPC від компанії Nvidia.

Під час розробки гри на рушії Unity мною було обрано систему Reinforcement Learning (RL) а саме його варіацію Proximal Policy Optimization (PPO) через її значні переваги. Вона має гарну Адаптивність, що дозволяє нейронні мережі надати NPC усі потрібні дані для швидкого адаптування до дій гравця, що створює більш живу і динамічну гру. Навчання на основі досвіду самого NPC що може покращити його поведінку через спроби та помилки, які робить його більш непередбачуваними та реалістичними, і схожим на гравця. Мінімізація програмування яка звільнить руки розробнику, і дасть можливість краще проробити інші більш важливі частини, замість того, щоб вручну прописувати поведінку кожного NPC. PPO є популярною технікою у RL, що дозволяє навчати агента (NPC) у більш стабільний і ефективний спосіб. Данна нейронна мережа оптимізує

політику агента, керуючи його діями в грі. В роботі використано PPO для навчання NPC, і як спосіб оптимізувати свій час та ресурси, щоб приділити їх іншим деталям.

Система PPO має декілька основних етапів-алгоритмів які вона використовує для навчання NPC, данні етапи та алгоритми, зображені у вигляді схеми на рисунку 2.

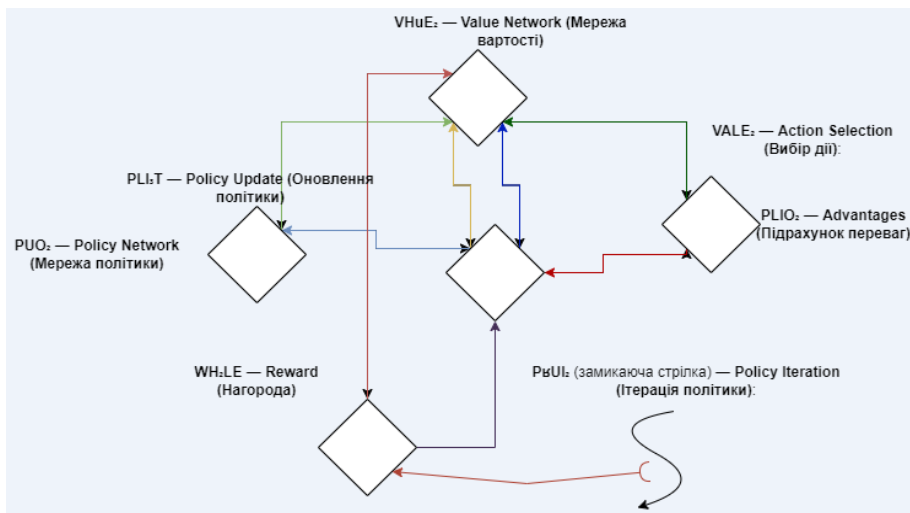


Рис. 2 – Схема роботи Proximal Policy Optimization

Дані алгоритми відповідають за окремі частини навчання NPC. Policy Network – відповідає за визначення ймовірності вибору певної дії в залежності від стану середовища у якому знаходиться NPC. Value Network – мережа вартості, дана мережа, відповідає за довгострокову оцінку цінності (reward) стану, допомагаючи визначити політику NPC. Action Selection – це мережа яка будує план подальших дій NPC, залежно від попередніх систем, враховуючи мережеву вартість, та становище NPC. Після виконання дії NPC отримує відгук – Reward (нагороду) від середовища що спонукає роботи його інші дії, для отримання нагород. Advantages – це перевага для кожної дії обчислюється на основі різниці між фактичною нагородою та очікуваною нагородою, що дає можливість обрати, які дія більш вигідна і швидше призведе до нагороди. Policy Update PPO – оновлення політики, використовує механізм званий *clipped objective*, щоб оновити дану схему. Це дозволяє уникнути великих змін в схемі, зберігаючи стабільність навчання та обмежуючи зміни в межах певного діапазону.

Поетапна розробка ШІ для NPC полягає з визначення сценаріїв взаємодії з гравцем та навколишнім ігровим світом і об'єктами які оточують його. На початковому етапі було визначено випадки, в яких NPC повинні реагувати на дії гравця. Наприклад, NPC можуть давати завдання, продавати предмети або допомагати у виконанні місій. Це дозволило створити базову модель їхньої поведінки. Після чого було використано систему PPO, яка отримала водні дані, а саме місце розташування, професію та як саме повинна поводити себе по відношенню до гравця. Далі було інтегровано самого NPC на відповідно йому локацію, рисунок 3, де система почала вивчати що її оточує та розробляти для себе відповідні сценарії, які у подальшому можна редагувати.



Рис. 3 – NPC на локації

Після інтеграції ІІІ було продемонстровано розумну взаємодію з NPC для торгівлі, також з можливістю адаптувати ціни на товари залежно від доступних ресурсів гравця. Також NPC проявив себе у відношенні до гравця, коли той виконує певну кількість його завдань, він подарував ресурс гравцю та надав знижку на товари.

Для тестування системи було проведено експерименти по визначенню мінімальних характеристик комп'ютера, необхідних для ефективної роботи зі штучним інтелектом під час розробки відеоігор. Оскільки для обробки дій NPC було застосовано алгоритми машинного навчання, зокрема нейронні мережі, які впливають на ресурсоемність гри. Експеримент проводився на кількох комп'ютерах із різними характеристиками, такими як процесор, оперативна пам'ять, відеокарта та SSD/жорсткий диск. Для кожної конфігурації був проведений моніторинг продуктивності гри за допомогою програмних інструментів, таких як MSI Afterburner, Task Manager та Unity Profiler.

Кожен тестовий запуск гри включав: аналіз завантаження центрального процесора (CPU); вимірювання використання оперативної пам'яті (RAM); моніторинг завантаження графічного процесора (GPU); оцінку часу відгуку штучного інтелекту в реальному часі (latency).

Таблиця 1 – Показники тестування

Параметри, що оцінюються	Найменування	Сцена з низьким навантаженням,	Сцена із середнім навантаженням	Сцена з високим навантаженням
		% – завантаження; ° – нагрів		
Завантаження CPU (%)	Intel Core i3 10-го покоління	60% 69°	86% 89°	95% 112°
	AMD Ryzen 5 3600	41% 54°	54% 62°	76% 85°
	Intel Core i7 12-го покоління	25% 45°	49% 53°	74% 71°
Завантаження GPU (%).	NVIDIA GeForce GTX 1050	78% 63°	89% 74°	99% 87°
	NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti	68% 58°	79% 69°	89% 78°
	NVIDIA RTX 3060	21% 38°	46% 41°	72% 67°
Завантаження RAM (%).	8 Гб-Kingston	67%	89%	100%
	16 Гб -Kingston	56%	78%	95%
	32 Гб -Kingston	32%	69%	79%
Накопичувач	HDD	Плавно	Невеликі затримки	Значні затримки
	SSD	Плавно	Плавно	Невеликі затримки

Оцінку часу відгуку ІІІ в реальному часі (latency)	Мінімальна конфігурація	300 мс	700 мс	1000 мс
	Базова конфігурація	150 мс	300 мс	700 мс
	Оптимальна конфігурація	100 мс	150 мс	300 мс
Середній FPS (кадри в секунду)	Мінімальна конфігурація	30 FPS	20 FPS	10 FPS
	Базова конфігурація	60 FPS	45 FPS	30 FPS
	Оптимальна конфігурація	120 FPS	89 FPS	42FPS

Отримані результати після проведення експерименту свідчать, що мінімальна конфігурація надає можливість запуску гри з низькими графічними налаштуваннями, але із затримками у реакції NPC. Базова конфігурація підтримує стабільну працю гри з середніми налаштуваннями. NPC функціонують із мінімальними затримками. Оптимальна конфігурація надає максимальну продуктивність, висока швидкість обробки штучного інтелекту та плавний ігровий процес навіть за умов високого навантаження.

Відповідно з отриманими результатами, зроблено висновки що для швидкої роботи NPC зі штучним інтелектом та коректної роботи гри, система потребує значних ресурсів, або підвищення оптимізації ресурсів з якими працює система.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У статті проаналізовано важливість розвитку відеоігор у сучасному суспільстві та роль штучного інтелекту у вдосконаленні ігрового процесу. Визначено, що відеоігри є потужним інструментом для популяризації культури, стимулювання економічного зростання та сприяння технологічному прогресу.

Досліджено застосування штучного інтелекту для створення ігрових механік, генерації текстур, анімації та вдосконалення NPC. Особлива увага приділена використанню Reinforcement Learning (RL) та алгоритму Proximal Policy Optimization (PPO), які дозволяють значно підвищити якість поведінки персонажів та оптимізувати процес розробки. Було визначено мінімально необхідні параметри комп'ютера для забезпечення стабільної роботи гри без втрати продуктивності або якості ігрового процесу.

Перспективи подальших досліджень включають вдосконалення методів навчання NPC для створення ще більш реалістичної взаємодії з гравцем, а також розробку нових технологій для підвищення інтерактивності й занурення у віртуальний світ.

Список бібліографічного опису

1. Video Game Spending Statistics. – Режим доступу: <https://www.fool.com/money/research/video-game-spending-statistics/>
2. Over 50% of developers use AI, and multiplayer games generate 10% more revenue. - Режим доступу: https://playua.net/ponad-50-rozrobnykiv-vykorystovuyut-shi-a-multipleyerni-igry-zaroblyayut-na-10-bilsh/?utm_source=chatgpt.com
3. Artificial intelligence is already enhancing the gaming experience. - Режим доступу: https://ua.tribuna.com/uk/blogs/samsung/3123023-shtuchnyy-intelekt-vzhe-pokrashchuye-heymskyy-dosvid-vid-roz/?utm_source=chatgpt.com
4. The Role of Artificial Intelligence in Video Game Development. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/375488989_The_Role_of_Artificial_Intelligence_in_Video_Game_Development
5. JAGLI, D., Nalla, S., Danikonda, S., & Nakirekanti, L. (2024). Artificial Intelligence Usage in Game Development. MDPI AG. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1983.v1>
6. Wu, Y., Yi, A., Ma, C., & Chen, L. (2023). Artificial intelligence for video game visualization, advancements, benefits and challenges. In *Mathematical Biosciences and Engineering* (Vol. 20, Issue 8, pp. 15345–15373). American Institute of Mathematical Sciences (AIMS). <https://doi.org/10.3934/mbe.2023686>
7. Tian, X. (2024). AI applications in video games and future expectations. In *Applied and Computational Engineering* (Vol. 54, Issue 1, pp. 161–170). EWA Publishing. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/54/20241484>
8. Pan, Z. (2023). The Application of Artificial Intelligence in Game. In *Highlights in Science, Engineering and Technology* (Vol. 76, pp. 462–466). Darcy & Roy Press Co. Ltd. <https://doi.org/10.54097/cyd0yy78>
9. Westera, W., Prada, R., Mascarenhas, S., Santos, P. A., Dias, J., Guimarães, M., Georgiadis, K., Nyamsuren, E., Bahreini, K., Yumak, Z., Christyowidiasmoro, C., Dascalu, M., Gutu-Robu, G., & Ruseti, S. (2019). Artificial

- intelligence moving serious gaming: Presenting reusable game AI components. In Education and Information Technologies (Vol. 25, Issue 1, pp. 351–380). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09968-2>
10. Yu, B. (2024). Research and Development of Artificial Intelligence in Electronic Games. In Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research (Vol. 7, pp. 279–284). Warwick Evans Publishing. <https://doi.org/10.62051/h1y2qe04>
11. Seidel, S., Berente, N., Lindberg, A., Lyytinen, K., Martinez, B., & Nickerson, J. V. (2020). Artificial Intelligence and Video Game Creation: A Framework for the New Logic of Autonomous Design. In Journal of Digital Social Research (Vol. 2, Issue 3, pp. 126–157). DIGSUM (Centre for Digital Social Research). <https://doi.org/10.33621/jdsr.v2i3.46>
12. ML-Agents Overview. - Режим доступу: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.ml-agents@3.0/manual/index.html>

References

1. Video Game Spending Statistics. – Режим доступу: <https://www.fool.com/money/research/video-game-spending-statistics/>
2. Over 50% of developers use AI, and multiplayer games generate 10% more revenue. - Режим доступу: https://playua.net/ponad-50-rozrobnykiv-vykorystovuyut-shi-a-multipleverni-igry-zaroblyayut-na-10-bilshe/?utm_source=chatgpt.com
3. Artificial intelligence is already enhancing the gaming experience. - Режим доступу: https://ua.tribuna.com/uk/blogs/samsung/3123023-shtuchnyy-intelekt-vzhe-pokrashchuye-heymskyy-dosvid-vid-roz/?utm_source=chatgpt.com
4. The Role of Artificial Intelligence in Video Game Development. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/375488989_The_Role_of_Artificial_Intelligence_in_Video_Game_Development
5. JAGLI, D., Nalla, S., Danikonda, S., & Nakirekanti, L. (2024). Artificial Intelligence Usage in Game Development. MDPI AG. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1983.v1>
6. Wu, Y., Yi, A., Ma, C., & Chen, L. (2023). Artificial intelligence for video game visualization, advancements, benefits and challenges. In Mathematical Biosciences and Engineering (Vol. 20, Issue 8, pp. 15345–15373). American Institute of Mathematical Sciences (AIMS). <https://doi.org/10.3934/mbe.2023686>
7. Tian, X. (2024). AI applications in video games and future expectations. In Applied and Computational Engineering (Vol. 54, Issue 1, pp. 161–170). EWA Publishing. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/54/20241484>
8. Pan, Z. (2023). The Application of Artificial Intelligence in Game. In Highlights in Science, Engineering and Technology (Vol. 76, pp. 462–466). Darcy & Roy Press Co. Ltd. <https://doi.org/10.54097/cyd0yy78>
9. Westera, W., Prada, R., Mascarenhas, S., Santos, P. A., Dias, J., Guimarães, M., Georgiadis, K., Nyamsuren, E., Bahreini, K., Yumak, Z., Christyowidiasmoro, C., Dascalu, M., Gutu-Robu, G., & Ruseti, S. (2019). Artificial intelligence moving serious gaming: Presenting reusable game AI components. In Education and Information Technologies (Vol. 25, Issue 1, pp. 351–380). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-09968-2>
10. Yu, B. (2024). Research and Development of Artificial Intelligence in Electronic Games. In Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research (Vol. 7, pp. 279–284). Warwick Evans Publishing. <https://doi.org/10.62051/h1y2qe04>
11. Seidel, S., Berente, N., Lindberg, A., Lyytinen, K., Martinez, B., & Nickerson, J. V. (2020). Artificial Intelligence and Video Game Creation: A Framework for the New Logic of Autonomous Design. In Journal of Digital Social Research (Vol. 2, Issue 3, pp. 126–157). DIGSUM (Centre for Digital Social Research). <https://doi.org/10.33621/jdsr.v2i3.46>
12. ML-Agents Overview. - Режим доступу: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.ml-agents@3.0/manual/index.html>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-21>

УДК 004.77, 613

Федонюк Юрій Анатолійович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0003-0942-227X>

Глинчук Людмила Ярославівна, к.фіз.-мат.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8943-9604>

Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

МОНІТОРИНГ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ПАЦІЄНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ІоТ

Федонюк Ю.А., Глинчук Л.Я. Моніторинг стану здоров'я пацієнтів за допомогою інформаційної технології ІоТ. У статті розглянуто особливості застосування ІоТ-пристроїв, які збирають медичні показники пацієнтів у реальному часі, та їх інтеграцію з методами машинного навчання для поліпшення якості даних. Описано типові підходи до корекції цих артефактів для забезпечення точності та надійності медичних діагностичних систем. Автори також зосереджуються на практичному використанні фільтрів для оптимізації опрацювання сигналів, що дозволяє досягти високої точності моніторингу стану здоров'я пацієнтів у реальному масштабі часу. Висвітлено основні технічні та методологічні виклики, пов'язані з інтеграцією ІоТ у медичні інформаційні системи, а також пропонуються шляхи їх вирішення для підвищення ефективності та точності моніторингу.

Ключові слова: Інтернет Речей, машинне навчання, моніторинг стану здоров'я пацієнтів, електрокардіограма, видалення шумів, фільтр низьких частот, низькочастотний дрейф, реальний час, медичні пристрої, інтеграція ІоТ і ML.

Fedoniuk Y., Hlynchuk L. Patient Health Monitoring Using IoT Information Technology. The paper examines the features of IoT devices that collect real-time medical parameters from patients and their integration with machine learning methods to improve data quality. The article describes common approaches to correcting these artifacts to ensure the accuracy and reliability of medical diagnostic systems. The authors also focus on the practical application of filters and machine learning methods to optimize signal processing, which enables high-precision patient monitoring in real-time. Key technical and methodological challenges associated with integrating IoT into medical systems are highlighted, and solutions are proposed to improve monitoring efficiency and accuracy.

Keywords: Internet of Things, machine learning, patient monitoring, electrocardiogram, noise removal, low-pass filter, low-frequency drift, real-time, medical devices, IoT and ML integration.

Постановка проблеми.

Моніторинг стану здоров'я пацієнтів у реальному часі з використанням ІоТ-пристроїв, інтегрованих з методами машинного навчання, є надзвичайно актуальним через зростання потреби у своєчасній медичній допомозі. Збільшення кількості пацієнтів із хронічними захворюваннями, таких як кардіоваскулярні хвороби, діабет та хронічні респіраторні патології, вимагає постійного контролю. Додатково, старіння населення створює додаткове навантаження на систему охорони здоров'я, а необхідність ранньої діагностики критичних станів підвищує шанси на ефективне лікування.

ІоТ-пристрої дозволяють збирати дані про життєво важливі показники, такі як серцевий ритм, рівень глюкози в крові, кисень у крові, артеріальний тиск, температура тіла, фізична активність тощо. Ці дані передаються в реальному часі через інтернет для аналізу, що знижує потребу в постійній присутності пацієнта у лікарні. Носимі пристрої, імпланти та інші компактні сенсори забезпечують мобільність пацієнтів і підвищують зручність використання таких рішень. Інтеграція цих пристроїв з методами машинного навчання значно розширює можливості аналізу даних. ML-алгоритми здатні виявляти аномалії у показниках пацієнта, прогнозувати ризики розвитку критичних станів, таких як інсульт або серцевий напад, а також надавати персоналізовані рекомендації. Системи, що використовують машинне навчання, можуть автоматично генерувати попередження або викликати медичну допомогу у разі потреби.

Цей підхід дозволяє значно скоротити час реакції медичних працівників у разі критичних ситуацій, мінімізує помилки, пов'язані із суб'єктивним самостереженням, та підвищує точність діагностики завдяки аналізу об'єктивних даних. Застосування таких технологій є ефективним у масштабі, адже дозволяє одному лікарю відстежувати стан сотень пацієнтів одночасно через централізовану платформу, а також знижує витрати завдяки скороченню кількості стаціонарних візитів. Приклади практичного використання включають моніторинг серцевого ритму у кардіології, контроль рівня глюкози у пацієнтів з діабетом, моніторинг кисню у крові у пацієнтів із легеневиими патологіями, а також відстеження фізичної активності та прогресу реабілітації.

Попри численні переваги, існують виклики, пов'язані із захистом конфіденційності даних, інтеграцією IoT-пристроїв з медичними інформаційними системами, а також забезпеченням точності моделей машинного навчання, що використовуються для аналізу. Перспективи розвитку включають ширше застосування хмарних обчислень, створення інтероперабельних стандартів для підключення пристроїв і впровадження передових технологій машинного навчання, таких як глибоке навчання, для більш точного аналізу складних сигналів. Таким чином, моніторинг стану здоров'я пацієнтів у реальному часі з використанням IoT-пристроїв, інтегрованих з ML, є ключовим кроком до цифрової трансформації медицини, сприяючи своєчасній діагностиці, персоналізованому підходу до лікування та оптимізації роботи системи охорони здоров'я.

Стан дослідження проблеми

Останні публікації, що стосуються моніторингу стану здоров'я пацієнтів за допомогою IoT та машинного навчання, висвітлюють різні аспекти цієї теми.

У статті "Пристрої віддаленого моніторингу пацієнтів (RPM) покращують охорону здоров'я" обговорюється використання безперебійної техніки роумінгу Bluetooth для збору даних про стан здоров'я пацієнта в реальному масштабі часу. Це дозволяє зберігати дані на сервері, навіть коли пацієнти переміщуються по будівлі, забезпечуючи низьку затримку менше 1 секунди [1]. У статті "Машинне навчання, потоковий Інтернет речей та підключені медичні пристрої" розглядається застосування машинного навчання для опрацювання даних моніторингу стану здоров'я пацієнтів за допомогою Apache Spark. Це дозволяє ефективно аналізувати потоки даних, що надходять від підключених медичних пристроїв.[2] У роботі "Штучний інтелект в медицині: можливості та перспективи ШІ" обговорюється роль штучного інтелекту в трансформації медичної галузі. Завдяки технологіям машинного і глибинного навчання ШІ забезпечує автоматизацію складних процесів, таких як аналіз медичних зображень та обробка великих обсягів даних, що дозволяє лікарям швидше та точніше діагностувати захворювання, пропонувати персоналізоване лікування та прогнозувати результати терапії [3]. У науковій праці "Розробка додатків для mHealth у 2025: Що потрібно знати" розглядаються виклики та тенденції у розробленні мобільних застосунків для охорони здоров'я, зокрема дистанційний моніторинг стану здоров'я пацієнтів за допомогою пристроїв IoT. Багатогранні пристрої Інтернету речей допомагають відстежувати стан здоров'я пацієнтів, що є важливим аспектом у розвитку mHealth [4]. У статті "TinyML: програми, обмеження та використання в пристроях IoT і мобільних пристроях" обговорюється розвиток методів машинного навчання та їх інтеграція в пристрої IoT. Це дозволяє здійснювати опрацювання даних безпосередньо на пристрої, що є важливим для моніторингу стану здоров'я пацієнтів у реальному часі. [5]

У магістерській роботі "IoT досліджує нові виміри догляду за пацієнтами за допомогою моніторингу стану здоров'я в режимі реального часу та доступу до даних про стан" розглядається використання IoT для моніторингу стану здоров'я пацієнтів в реальному масштабі часу, що дозволяє покращити якість медичного обслуговування[6]. У статті "Що таке машинне навчання: як працює та де використовується" пояснюється, що машинне навчання є галуззю штучного інтелекту, яка фокусується на розробленні алгоритмів і статистичних моделей, що дозволяють комп'ютерам виконувати завдання без явного програмування[7]. У статті "Як працює збір даних IoT" надається вичерпний аналіз збору даних IoT, пропонується чіткий, структурований підхід до ефективного збору та опрацювання даних, що є важливим для моніторингу стану здоров'я пацієнтів [8]. У статті "Моніторингова IoT-мережа на базі LORAWAN та MQTT" розглядається моніторинг стану мережі IoT, зокрема на базі LORAWAN та MQTT, що є важливим для забезпечення ефективного збору та передачі даних у системах моніторингу стану здоров'я пацієнтів. [9]

Ці публікації підкреслюють важливість інтеграції IoT та машинного навчання для ефективного моніторингу стану здоров'я пацієнтів, що дозволяє покращити якість медичного обслуговування та забезпечити своєчасну діагностику та лікування.

Основною **метою статті** є розроблення ефективного підходу до моніторингу стану здоров'я пацієнтів за допомогою технологій Інтернету Речей (IoT) та методів машинного навчання (ML). Для досягнення цієї мети необхідно вирішити кілька важливих завдань:

1. Проаналізувати сучасні підходи до розроблення систем збору медичних даних у реальному масштабі часу з використанням IoT-пристроїв, таких як смарт-годинники, фітнес-браслети, медичні пластири, які фіксують основні фізіологічні показники пацієнтів (серцевий ритм, рівень цукру в крові, кисень у крові, артеріальний тиск тощо).

2. Проаналізувати можливість використання методів для видалення шумів та артефактів у медичних даних, зокрема високочастотних шумів і низькочастотних дрейфів, для забезпечення точності та надійності результатів моніторингу.

Виклад основного матеріалу

Моніторинг стану здоров'я пацієнтів у реальному масштабі часу з використанням IoT-пристроїв, інтегрованих з методами машинного навчання, має величезний потенціал для покращення якості медичних послуг.

Ключові компоненти моніторингу стану здоров'я пацієнтів включають IoT-пристрої для збору даних та типи зібраних медичних показників. IoT-пристрої для збору медичних даних відіграють ключову роль у персоналізованому моніторингу здоров'я. Зібрані дані можуть включати серцевий ритм, рівень цукру в крові (глюкометри), кисень у крові (SpO₂), артеріальний тиск, температуру тіла, фізичну активність та якість сну. Особливості використання IoT-пристроїв залежать від типу пристрою та параметрів, які вони вимірюють. Існують різні типи IoT-пристроїв для збору даних, зокрема носимі пристрої, такі як смарт-годинники, фітнес-браслети та медичні пластири. Ці пристрої призначені для постійного носіння, підходять для тривалого моніторингу фізіологічних показників і мають високу зручність для пацієнтів. Дані збираються у реальному масштабі часу та передаються через Bluetooth або Wi-Fi. Перевагами носимих пристроїв є простота використання та можливість широкого застосування у щоденному житті. Проте вони мають обмежений час роботи на батареї та можуть бути чутливими до фізичних перешкод, наприклад, неправильного носіння.

Методи опрацювання даних, отриманих із смарт-годинників, фітнес-браслетів та медичних пластирів, включають кілька етапів, що забезпечують точність та коректність зібраних медичних показників. Дані з цих пристроїв зазвичай включають фізіологічні показники пацієнтів, такі як серцевий ритм, рівень цукру в крові, кисень у крові, артеріальний тиск, температура тіла та інші параметри, які збираються у реальному часі. Зібрані дані мають пройти попереднє опрацювання для зниження впливу шумів та артефактів, які можуть виникнути під час вимірювань через помилки в передачі сигналу або фізичні перешкоди. На першому етапі дані очищаються від викидів, які можуть бути викликані несправністю пристроїв або зовнішніми факторами, наприклад, рухами або неправильним носінням пристрою. Для цього використовуються методи фільтрації сигналів, такі як фільтри низьких та високих частот, які дозволяють відфільтрувати непотрібні частоти та підвищити точність даних. Одним із поширених методів є застосування фільтрів низьких частот (ФНЧ), які допомагають знизити високочастотний шум, що може виникнути в результаті електронних перешкод. Інші методи включають використання статистичних технік, таких як зсув середнього або експоненціальне згладжування, для згладжування даних і поліпшення їх якості.

Далі, після очищення даних, здійснюється їх аналіз для виявлення аномалій або трендів, використовуючи алгоритми машинного навчання (ML), зокрема методи класифікації та регресії, щоб передбачити потенційні ризики для здоров'я пацієнта або визначити необхідність змін у лікуванні. Наприклад, алгоритми можуть визначити відхилення в серцевому ритмі або інші фізіологічні зміни, що свідчать про проблеми зі здоров'ям. Для цього можуть використовуватися як прості моделі, так і складні нейронні мережі, які навчаються на великих обсягах даних, щоб забезпечити більш точні прогнози. Існують також методи для нормалізації даних, коли значення певного параметра приводяться до єдиного масштабу для забезпечення коректного порівняння різних показників.

Важливим етапом є інтеграція даних із різних джерел, оскільки кожен пристрій може вимірювати різні параметри. Застосування методів об'єднання даних дозволяє створити повніше та точніше уявлення про стан здоров'я пацієнта, комбінуючи інформацію з кількох пристроїв. Це допомагає створити більш точні моделі здоров'я та виявити потенційні проблеми на ранніх етапах. Крім того, дані з IoT-пристроїв можуть бути інтегровані з медичними інформаційними системами для забезпечення реального моніторингу пацієнтів. На завершальному етапі здійснюється візуалізація результатів, що дозволяє лікарям або пацієнтам самостійно оцінювати стан здоров'я через інтерфейси користувача.

Таким чином, опрацювання даних, отриманих із смарт-годинників, фітнес-браслетів та медичних пластирів, включає етапи очищення, фільтрації, аналізу за допомогою алгоритмів машинного навчання та візуалізації результатів для забезпечення своєчасного реагування на зміни в стані пацієнта. Опрацювання даних із носимих пристроїв потребує комплексного підходу, що

включає збирання, очищення, аналіз та інтерпретацію. Для цього використовуються різні методи, які можна класифікувати за етапами роботи з даними.

У даній статті детальніше проаналізуємо етап попереднього опрацювання даних. Видалення шумів та артефактів є важливим етапом попереднього опрацювання даних, отриманих із IoT-пристроїв. Залежно від типу даних (сигнали, зображення, текст), застосовуються різні методи видалення шумів. Важливим є фільтрація сигналів з використанням фільтрів низьких та високих частот для видалення високочастотних шумів або низькочастотних дрейфів.

Фільтри низьких частот використовуються для видалення високочастотних шумів. Фільтри низьких частот пропускають сигнали з частотами, нижчими за задану порогову частоту (f_c), та пригнічує (зменшує) сигнали з частотами вище цього порогу. Він використовується для видалення високочастотних шумів, які можуть спотворювати корисний сигнал. Фільтр має порогову частоту (f_c), нижче якої сигнал передається без значного послаблення. Частоти вище f_c пригнічуються, оскільки вони найчастіше відповідають шуму. Фільтри реалізуються у вигляді аналогового фільтру, який використовується в апаратних пристроях (резистори, конденсатори). Цифровий фільтр реалізований у програмному забезпеченні для опрацювання дискретних сигналів.

Проаналізуємо типи фільтрів низьких частот. Ідеальний ФНЧ повністю блокує всі частоти вище f_c , проте його використання неможливе у реальному масштабі часу через різке обрізання частот. Ідеальний низькочастотний фільтр є теоретичним концептом, який використовується як орієнтир для проектування реальних фільтрів. Він має низку характеристик, що визначають його ідеальні властивості. Ідеальний ФНЧ пропускає всі частоти нижче певного значення (f_c), які відносяться до низькочастотних компонентів сигналу. Частоти вище f_c повністю відсікаються.

$$H(f) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } |f| \leq f_c \\ 0, \text{ якщо } |f| > f_c \end{cases}$$

У ідеального ФНЧ перехід між пропускнуою та заглушеною смугами відбувається миттєво при частоті f_c . Це забезпечує абсолютну точність розподілу між бажаними і небажаними частотами. У пропускнуій смузі ($f \leq f_c$) амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) залишається постійною та дорівнює одиниці. Це означає, що низькочастотні сигнали проходять без спотворення. Ідеальний ФНЧ не вносить фазових спотворень у сигнал, тобто фазова характеристика є лінійною функцією частоти. Це дозволяє зберігати часові характеристики сигналу. Ідеальний ФНЧ має нескінченний порядок, що означає, що його імпульсна характеристика є нескінченно довгою. Це вимагає нескінченної обчислювальної потужності для реалізації. Імпульсна характеристика ідеального ФНЧ є синусоїдальною функцією виду $h(t) = \text{sinc}(2f_c t)$, де $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$. Вона нескінченно простягається в часі, що створює складності при фізичній реалізації. Ідеальний фільтр має симетрію навколо осі $f=0$, що забезпечує однакове опрацювання сигналів як у позитивній, так і в негативній частотній області. Всі частоти нижче f_c проходять через фільтр без жодного загасання, тобто амплітуда сигналу зберігається на 100%. Ідеальний ФНЧ не може бути реалізований фізично через його нескінченний порядок та нескінченну імпульсну характеристику. У реальних системах використовуються апроксимації ідеального ФНЧ, такі як фільтри Баттерворта, Чебишева або еліптичні фільтри. Вони намагаються забезпечити максимально наближені характеристики до ідеального фільтра. Навіть у реальних фільтрах з обмеженою смугою переходу можливе певне загасання бажаних частот або часткове проходження небажаних частот. Ідеальний ФНЧ є еталоном, що визначає основні характеристики фільтрів для опрацювання сигналів. Однак через фізичні обмеження в реальних системах використовуються лише його апроксимації. Тим не менш, знання ідеальних властивостей допомагає при розробці фільтрів, які максимально відповідають практичним вимогам.

Реальні ФНЧ використовуються для плавного придушення високих частот. Для цього використовується фільтр Баттерворта, що забезпечує плавну передавальну функцію без хвиль у смузі пропускання. Фільтр Баттерворта — це один із найпоширеніших типів аналогових і цифрових фільтрів, який забезпечує плавний перехід між пропускнуою і заглушеною смугами. Його головна особливість полягає в максимально гладкій АЧХ у пропускнуій смузі, що робить його універсальним у багатьох застосуваннях. На відміну від інших фільтрів, таких як Чебишева чи еліптичного, фільтр Баттерворта не має пульсацій у пропускнуій смузі. АЧХ плавно змінюється від значення 1 до 0 в міру наближення до частоти зрізу (f_c). Частота, на якій амплітуда сигналу зменшується до $1/2 \approx 0.707$ від

максимальної амплітуди (або до -3 дБ). Порівняно ширша, ніж у інших фільтрів (наприклад, Чебишева), оскільки гладкість АЧХ у пропускній смузі досягається за рахунок менш стрімкого згасання сигналу в заглушеній смузі. Передавальна функція фільтра описується поліномом Баттерворта $H(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{f}{f_c})^{2N}}}$, де N — порядок фільтра. Інтенсивність згасання сигналу в заглушеній

смузі зростає із підвищенням порядку N . Для високих частот АЧХ спадає зі швидкістю $20N$ дБ на декаду. Чим вищий порядок фільтра, тим ближче його характеристика до ідеального фільтра, але це збільшує складність його реалізації. Хоча фільтр Баттерворта забезпечує гладкість АЧХ, його фазова характеристика є нелінійною, що може призводити до фазових спотворень у сигналі. Фільтр Баттерворта залишається стандартом у проектуванні інформаційних систем, де потрібне збалансоване поєднання гладкості АЧХ та помірної складності реалізації.

Фільтр Чебишева дозволяє більший перепад у амплітудно-частотній характеристиці, але забезпечує крутіший спад. Фільтр Чебишева є високоефективним типом аналогових і цифрових фільтрів, який забезпечує крутіший спад сигналу в заглушеній смузі порівняно з фільтром Баттерворта. Це досягається за рахунок допустимих пульсацій амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) у пропускній смузі або заглушеній смузі, залежно від його типу. Такі фільтри першого типу мають пульсацію АЧХ лише у пропускній смузі, тоді як у заглушеній смузі АЧХ спадає монотонно. Другого - лише в заглушеній смузі, тоді як у пропускній смузі АЧХ є монотонною (застосовується рідше через складність реалізації). Передавальна функція фільтра базується на використанні поліномів Чебишева, які забезпечують пульсації:

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 T_N^2(f/f_c)}}$$

де $T_N(x)$ — поліном Чебишева N -го порядку, ϵ — параметр, що визначає рівень пульсацій у пропускній смузі.

Фільтр Чебишева забезпечує стрімкіший перехід між пропускною та заглушеною смугами порівняно з фільтром Баттерворта. АЧХ у заглушеній смузі спадає зі швидкістю $20N$ дБ на декаду або більше залежно від порядку фільтра. Нелінійна фазова характеристика може призводити до фазових спотворень, що слід враховувати при обробці сигналів.

Рухоме середнє, що є простим способом згладжування сигналу. Метод рухомого середнього є простим, але ефективним способом згладжування даних і видалення шумів із сигналу. Цей метод використовується для аналізу тимчасових рядів, фільтрації сигналів та прогнозування. Метод рухомого середнього згладжує сигнал, замінюючи кожену точку даних середнім значенням із фіксованої кількості сусідніх точок у вибірці. Формула виглядає так:

$$MA_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} x[i]$$

де MA_k — значення рухомого середнього у точці k , N — розмір вікна, $x[i]$ — значення сигналу в точці i .

Розмір вікна N визначає кількість точок, які використовуються для обчислення середнього значення. Чим більше N , тим більш згладженим буде сигнал, але тим більша ймовірність втрати дрібних деталей. Фільтр видаляє високочастотний шум, зберігаючи низькочастотні компоненти сигналу та придатний для роботи з біомедичними сигналами, фінансовими даними та показниками фізичної активності. Серед переваг слід відзначити легкість використання для обчислення та інтеграції у різні системи. Використовує прості арифметичні операції, що робить його швидким для виконання навіть на пристроях із низькою продуктивністю.

До прикладу для смарт-годинника, який вимірює серцевий ритм, метод рухомого середнього може використовуватися для згладжування сигналу й видалення шумів, що виникають через фізичну активність або електромагнітні перешкоди, забезпечуючи більш точний аналіз серцевих скорочень.

Обрання того чи іншого фільтра для опрацювання даних залежить від характеристик самих даних.

Розглянемо приклад роботи фільтра низьких частот на даних, отриманих з фітнес-браслету, який вимірює серцевий ритм. Серцевий ритм може бути підданий шуму, зокрема високочастотним перешкодам, спричиненим рухами користувача чи електронними шумами. Для опрацювання таких даних використовуватимемо ФНЧ виконаємо наступний алгоритм.

Крок 1. Збір даних.

На цьому кроці фітнес-браслет збирає дані про серцевий ритм з використанням інформаційної технології IoT через давачі, що розміщені на шкірі пацієнта. Наприклад, значення серцевого ритму виглядає так:

[0.5,0.8,1.2,1.5,1.7,2.0,2.2,1.9,1.5,1.1,0.9,0.7]

Крок 2. Виявлення шумів.

У реальних умовах на ці дані можуть впливати високочастотні перешкоди, зокрема від рухів, що створюють короткочасні сплески на графіку. Це можна візуалізувати як швидкі зміни між сусідніми значеннями.

Крок 3. Використання фільтра низьких частот.

ФНЧ дозволяє пройти тільки низькочастотним компонентам сигналу (власне, інформаційним частотам, таким як нормальний серцевий ритм) та блокує високочастотні коливання (шум).

Формула для одностадійного цифрового ФНЧ виглядає так:

$$y[n]=\alpha \cdot x[n]+(1-\alpha) \cdot y[n-1]$$

де $y[n]$ — це опрацьований сигнал на поточному етапі, $x[n]$ — це вхідний сигнал (неопрацьовані дані), α — коефіцієнт фільтра (визначає, наскільки фільтр буде чутливий до нових значень, зазвичай $0 < \alpha < 1$).

Крок 4. Обчислення фільтрованого сигналу.

Для простоти, припустимо, що значення $\alpha=0.1$. Тепер обчислюємо опрацьовані значення для кожного етапу:

- $y[0]=\alpha \cdot x[0]=0.1 \cdot 0.5=0.05$ $y[1]=\alpha \cdot x[1]+(1-\alpha) \cdot y[0]=0.1 \cdot 0.8+0.9 \cdot 0.05=0.08+0.045=0.125$
- $y[2]=0.1 \cdot 1.2+0.9 \cdot 0.125=0.12+0.1125=0.2325$
- $y[3]=0.1 \cdot 1.5+0.9 \cdot 0.2325=0.15+0.20925=0.35925$
- і так далі для всіх наступних етапів.

Після опрацювання всіх значень сигналу ми отримуємо фільтровану криву, яка виглядатиме значно рівніше, без різких коливань, характерних для шуму.

Крок 5. Фільтрований сигнал (після застосування ФНЧ) виглядає таким чином [0.05,0.125,0.2325,0.35925,0.42375,0.498375,0.558525,0.576075,0.56425,0.528875,0.4766,0.41355]

Крок 6. Результат.

Після фільтрації даних серцевого ритму ми отримуємо значення, які краще відображають реальний стан пацієнта, зменшуючи вплив зовнішнього шуму. Очищений сигнал є більш стійким і дозволяє точніше аналізувати коливання серцевого ритму без перешкод, що виникають від рухів або інших джерел шуму.

Цифровий ФНЧ є ефективним інструментом для очищення даних, отриманих із носимих пристроїв, таких як фітнес-браслети, смарт-годинники та медичні пластири, від високочастотного шуму. Це дозволяє отримати точніші та надійніші дані для подальшого моніторингу та аналізу стану здоров'я пацієнта.

Припустимо маємо вхідні дані, які характеризують наявний синтетичний сигнал, що містить корисний низькочастотний сигнал (наприклад, синусоїда), високочастотний шум (наприклад, випадковий білий шум).

Вхідний сигнал ($x[n]$)

$$x[n] = \sin(2\pi f_1 n) + 0.3 \text{random_noise}$$

$$x[n]=\sin(2\pi f_1 n)+0.3 \cdot \text{random_noise},$$

де $f_1=1$ Гц — частота корисного сигналу, random_noise - високочастотний шум.

Налаштування параметрів фільтра частота дискретизації $f_s=100$ Гц, часова константа $RC=0.1$ с,

$$\alpha = \frac{\Delta t}{RC+\Delta t},$$

$$\text{де } \Delta t = \frac{1}{f_s}$$

$$\alpha = \frac{1}{1000,1} + \frac{1}{100} = 0,09$$

Після застосування ФНЧ високочастотний шум (>1 Гц) пригнічено. Низькочастотний сигнал ($f_1=1$ Гц) збережено.

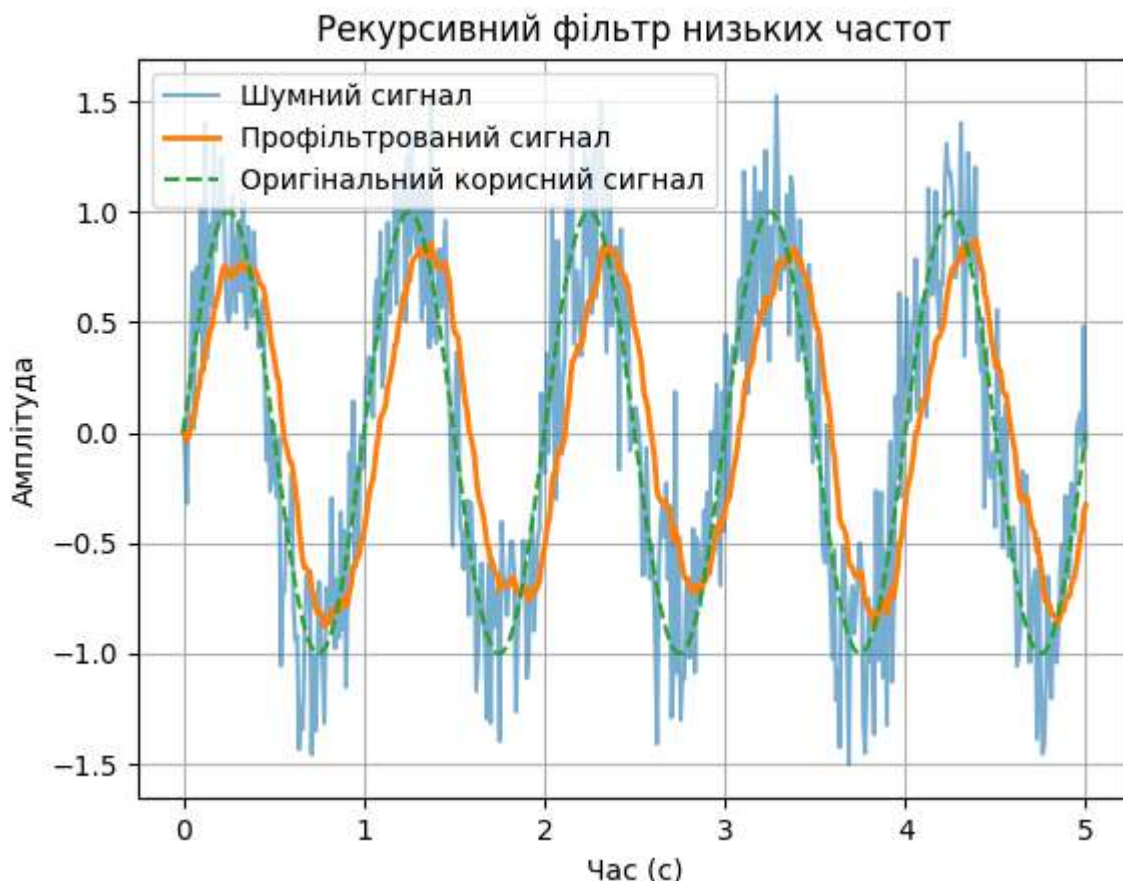


Рис. 1 Результати фільтрації шумів

На графіку **синя крива** - початковий шумний сигнал, **оранжева крива** - профільтрований сигнал, **зелена пунктирна лінія** -оригінальний корисний сигнал (для порівняння).

Рекурсивний ФНЧ ефективно видаляє високочастотний шум і зберігає корисний низькочастотний сигнал. Завдяки простоті реалізації, його можна застосовувати в реальному часі для опрацювання даних з ЕКГ, носимих пристроїв та інших медичних сенсорів.

Імплементація ФНЧ в інформаційну систему для опрацювання даних із медичних сенсорів передбачає інтеграцію алгоритмів цифрової фільтрації з можливістю реального часу. Вона починається зі збирання даних із таких джерел, як носимі пристрої (смарт-годинники, фітнес-браслети, медичні пластири) та інші медичні сенсори (глюкометри, пульсоксиметри). Дані зазвичай надходять у вигляді дискретних сигналів через бездротові протоколи, такі як Bluetooth або Wi-Fi, чи через дротові інтерфейси, як-от USB або UART. Частота дискретизації залежить від пристрою, наприклад, для ЕКГ вона може становити від 250 до 500 Гц. Після збору даних виконується їх передопрацювання, яка включає нормалізацію сигналу для усунення різниці в амплітудах, спричиненої різними сенсорами, та усунення можливих артефактів, зокрема значень, які виходять за фізіологічно допустимі межі.

Проектування інформаційної системи передбачає вибір типу ФНЧ, такого як фільтр Баттерворта, який забезпечує плавну амплітудно-частотну характеристику; фільтр Чебишева, який є ефективним для сигналів, де важлива крутість зрізу; або фільтр рухомого середнього, що є

простим і підходить для задач зі слабкими обчислювальними ресурсами. Важливими параметрами проектування є частота зрізу, яка вибирається залежно від типу сигналу, наприклад, для ЕКГ це може бути 40 Гц, щоб видалити високочастотні шуми, і порядок фільтра, що визначає крутизну зрізу.

Імплементация цифрового ФНЧ може включати фільтри FIR, які використовують метод згортки й є стабільними та простими, або фільтри IIR, які працюють на основі рекурсивних рівнянь і забезпечують ефективність. Для реалізації використовуватиметься мова програмування Python із бібліотекою `scipy.signal` та мови програмування C++ і Java для вбудованих систем, де важлива швидкодія. Фільтрація у реальному часі передбачає опрацювання потокових даних із буферизацією та оптимізацію алгоритмів для швидкого виконання на мікроконтролерах чи хмарних серверах.

Інтеграція фільтра в інформаційну систему включає модуль для збору даних, який приймає сигнали від сенсорів, модуль фільтрації, що застосовує ФНЧ до кожного сигналу окремо, і модуль збереження, який зберігає відфільтровані дані у базі даних або передає їх у хмару для подальшого аналізу. Інтерфейс користувача забезпечуватиме візуалізацію сигналу до та після фільтрації, а також можливість налаштування частоти зрізу.

Завершальним етапом є тестування та оптимізація системи, що включає валідацію якості фільтрації за допомогою реальних даних, зокрема ЕКГ-сигналів із шумами та без, і забезпечення мінімальних затримок та низьких обчислювальних витрат для підвищення продуктивності.

Наведемо приклад коду `from scipy.signal import butter, lfilter`

```
# Функція проектування LPF
def butter_lowpass(cutoff, fs, order=4):
    nyquist = 0.5 * fs
    normal_cutoff = cutoff / nyquist
    b, a = butter(order, normal_cutoff, btype='low', analog=False)
    return b, a

# Фільтрація сигналу
def lowpass_filter(data, cutoff, fs, order=4):
    b, a = butter_lowpass(cutoff, fs, order)
    y = lfilter(b, a, data)
    return y

# Параметри
fs = 500 # Частота дискретизації
cutoff = 40 # Частота зрізу
data = [0.1, 0.2, 0.15, 0.35, 0.4, 0.2, 0.1] # Вхідний сигнал

# Фільтрація
filtered_data = lowpass_filter(data, cutoff, fs)
```

```
print(filtered_data)
```

Перевагами використання ФНЧ для медичних сигналів є видалення шумів, викликаних електромагнітними перешкодами або рухами пацієнта, покращення точності аналізу фізіологічних параметрів, забезпечення надійної роботи алгоритмів машинного навчання, які потребують якісних даних. Імплементация ФНЧ в інформаційні системи для опрацювання даних із медичних сенсорів є важливим кроком для забезпечення надійного моніторингу стану здоров'я пацієнтів у реальному часі. Оптимально налаштовані фільтри дозволяють підвищити якість сигналів, що критично важливо для точного аналізу та прийняття клінічних рішень.

Висновки.

Моніторинг стану здоров'я пацієнтів за допомогою технологій Інтернету речей демонструє значний потенціал у сучасній медицині завдяки можливості збору, аналізу та візуалізації медичних даних у реальному масштабі часу. У дослідженні показано важливість попереднього опрацювання медичних сигналів, зокрема видалення високочастотних шумів та низькочастотних дрейфів, для забезпечення високої точності та надійності діагностичних систем. Інтеграція IoT-пристроїв із

методами машинного навчання дозволяє не лише автоматизувати процес аналізу даних, але й підвищити якість та достовірність результатів.

Застосування фільтрів низьких частот продемонструвало ефективність у зменшенні шумів, які виникають під час збору сигналів, таких як електрокардіограми, що є критично важливим для точного моніторингу серцевого ритму. Запропоновані методи оптимізації, такі як використання сучасних алгоритмів цифрової фільтрації та архітектур систем реального часу, забезпечують ефективність та надійність систем моніторингу.

Впровадження IoT у сферу охорони здоров'я відкриває нові можливості для персоналізованої медицини, дозволяючи здійснювати безперервний моніторинг стану здоров'я пацієнтів, швидко реагувати на зміни у стані їхнього здоров'я та підвищувати якість медичної допомоги. Подальші дослідження в цій сфері повинні бути спрямовані на вирішення проблем масштабованості, інтероперабельності та безпеки, що дозволить створити ще більш досконалі системи для моніторингу стану здоров'я пацієнтів.

Список бібліографічного опису:

1. Dusuniot. (н.д.). *Пристрої для моніторингу стану пацієнтів на відстані покращують охорону здоров'я*. Dusuniot. URL: <https://surl.li/veuwlu> (дата звернення: 17.01.2025 р).
2. Isearch.kiev.ua. (н.д.). *Машинне навчання, потокові інтернет речей і підключені медичні пристрої*. Isearch.kiev.ua. URL: <https://surl.li/tmasmh> (дата звернення: 17.01.2025 р).
3. Proit.ua. (н.д.). *Штучний інтелект у медицині: можливості та перспективи AI*. Proit.ua. URL: <https://surl.li/yxqjuv> (дата звернення: 19.01.2025 р).
4. Stfalcon.com. (н.д.). *Розробка додатків для mHealth: виклики, тенденції та основні характеристики*. Stfalcon.com. URL: <https://surl.gd/iukmhn> (дата звернення: 17.01.2025 р).
5. Unite.ai. (н.д.). *TinyML: обмеження та застосування в IoT і мобільних пристроях*. Unite.ai. URL: <https://surl.li/weiktr> (дата звернення: 19.01.2025 р).
6. Ela.kpi.ua. (н.д.). *IoT відкриває нові виміри догляду за пацієнтами через моніторинг здоров'я в реальному часі та доступ до даних*. Ela.kpi.ua. URL: <https://surl.gd/ehdpse> (дата звернення: 19.01.2025 р).
7. Gigacloud.ua. (н.д.). *Що таке машинне навчання: як це працює та де використовується*. Gigacloud.ua. URL: <https://surl.cc/qqvcyb> (дата звернення: 18.01.2025 р).
8. Dusuniot.com. (н.д.). *Збір даних IoT [Повний посібник 2024]*. Dusuniot.com. URL: <https://surl.li/rmhcfi> (дата звернення: 19.01.2025 р).
9. Krs.chmnu.edu.ua. (н.д.). *Моніторинг мережі IoT на основі LORAWAN і MQTT*. Krs.chmnu.edu.ua. URL: <https://surl.li/hlzhha> (дата звернення: 19.01.2025 р).

References:

1. Dusuniot. Remote patient monitoring devices improve healthcare. Dusuniot. URL: <https://surl.li/veuwlu> (date of application: 17.01.2025 p).
2. Isearch.kiev.ua. (н.д.). Machine learning, streaming Internet of Things, and connected medical devices. Isearch.kiev.ua. URL: <https://surl.li/tmasmh> (date of application: 17.01.2025 p).
3. Proit.ua. (н.д.). Artificial Intelligence in Medicine: Opportunities and Prospects of AI. Proit.ua. URL: <https://surl.li/yxqjuv> (date of application: 19.01.2025 p).
4. Stfalcon.com. (н.д.). Development of mHealth applications: challenges, trends and key features. Stfalcon.com. URL: <https://surl.gd/iukmhn> (date of application: 17.01.2025 p).
5. Unite.ai. (н.д.). TinyML: limitations and applications in IoT and mobile devices. Unite.ai. URL: <https://surl.li/weiktr> (date of application: 19.01.2025 p).
6. Ela.kpi.ua. (н.д.). IoT opens up new dimensions of patient care through real-time health monitoring and data access. Ela.kpi.ua. URL: <https://surl.gd/ehdpse> (date of application: 19.01.2025 p).
7. Gigacloud.ua. (н.д.). What is machine learning: how it works and where it is used. Gigacloud.ua. URL: <https://surl.cc/qqvcyb> (date of application: 18.01.2025 p).
8. Dusuniot.com. (н.д.). IoT Data Collection [Complete Guide 2024]. Dusuniot.com. URL: <https://surl.li/rmhcfi> (date of application: 19.01.2025 p).
9. Krs.chmnu.edu.ua. (н.д.). IoT network monitoring based on LORAWAN and MQTT. Krs.chmnu.edu.ua. URL: <https://surl.li/hlzhha> (date of application: 19.01.2025 p).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-22>

УДК 004.032.2

Горкуненко Андрій Борисович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2021-006X>

Сверстюк Андрій Степанович, д.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0001-8644-0776>

Тернопільський національний медичний університет ім. І.Я. Горбачевського, м. Тернопіль, Україна

НАУКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МЕДИЧНІЙ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Горкуненко А.Б., Сверстюк А.С. Науково-аналітичне дослідження застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації. У даній науковій роботі проведено аналітичне дослідження сучасних підходів до застосування штучного інтелекту (ШІ) у медичній візуалізації. Використовуючи базу даних Scopus, здійснено аналіз наукових публікацій за період 2014–2024 років. Визначено ключові тенденції, виклики та перспективи розвитку ШІ у радіології, діагностиці та суміжних напрямках. Дослідження виявило експоненційне зростання кількості наукових праць із середини 2010-х років, що пояснюється розвитком глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN) і трансформерів. Провідними центрами досліджень є установи США та Китаю, основними джерелами фінансування – National Institutes of Health (NIH) та National Natural Science Foundation of China (NSFC). Незважаючи на значні досягнення, актуальними залишаються питання надійності алгоритмів, їхньої інтерпретованості та етичні аспекти. Подальші дослідження спрямовані на покращення точності моделей і їх адаптацію до клінічної практики.

Ключові слова: аналітика, штучний інтелект, медична візуалізація, глибоке навчання, машинне навчання, біомедична інженерія.

Horkunenko A., Sverstiuk A. Scientific and Analytical Study on the Application of Artificial Intelligence in Medical Imaging. This scientific paper presents an analytical study of modern approaches to the application of artificial intelligence (AI) in medical imaging. This study analyzes scientific publications from 2014 to 2024 using the Scopus database. Key trends, challenges, and prospects for AI development in radiology, diagnostics, and related fields were identified. The study revealed an exponential increase in the number of scientific papers since the mid-2010s, which is attributed to the advancement of deep learning, particularly convolutional neural networks (CNN) and transformers. The leading research centers are institutions in the United States and China, with the primary sources of funding being the National Institutes of Health (NIH) and the National Natural Science Foundation of China (NSFC). Despite significant achievements, issues of algorithm reliability, interpretability, and ethical considerations remain relevant. Future research is aimed at improving model accuracy and adapting them to clinical practice.

Keywords: analytics, artificial intelligence, medical imaging, deep learning, machine learning, biomedical engineering.

Вступ. Медична візуалізація є однією з ключових галузей сучасної медицини, яка дозволяє забезпечувати точну діагностику, моніторинг захворювань і планування лікування. Водночас зростання обсягів даних, отриманих з сучасних методів візуалізації, таких як КТ, МРТ, УЗД тощо, ускладнює їх своєчасну та якісну інтерпретацію лікарями. Це створює потребу в автоматизованих системах аналізу, здатних забезпечити високу точність, швидкість і надійність у прийнятті рішень. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) виступає потужним інструментом для розв'язання вказаних проблем [1].

Проте впровадження ШІ у медичну візуалізацію супроводжується низкою викликів. По-перше, складність алгоритмів машинного навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN) і трансформери, часто призводить до проблеми їх інтерпретованості, що ускладнює використання цих моделей у клінічній практиці. Лікарі повинні розуміти, як і чому ШІ приймає певні рішення, оскільки це напряму впливає на довіру до системи [2].

По-друге, існує проблема стандартизації та валідації алгоритмів ШІ. Для їх застосування у реальній клінічній практиці необхідні чіткі протоколи оцінки ефективності та безпеки. Відсутність узгоджених стандартів перешкоджає масовому впровадженню технологій ШІ у різних країнах та установах [3].

Також важливим залишається питання доступності високоякісних медичних даних, що є критично необхідними для навчання ШІ. Дані мають бути не лише достатньо об'ємними, а й відповідати вимогам щодо точності розмітки та збереження конфіденційності. Це накладає додаткові технічні й етичні вимоги до використання ШІ у медицині [4].

Нарешті, інтеграція ШІ у клінічну практику потребує врахування етичних аспектів, зокрема збереження приватності пацієнтів та визначення відповідальності за рішення, прийняті алгоритмами. Ці питання мають бути розв'язані задля підвищення довіри з боку медичної спільноти та пацієнтів [5].

Таким чином, наукова проблема полягає у необхідності системного аналізу сучасного стану застосування ШІ у медичній візуалізації, подолання зазначених викликів та формування стратегій для оптимального використання цих технологій у медицині [6].

Мета роботи. Метою дослідження є проведення науково-аналітичного дослідження сучасних підходів та перспектив застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації, що включає огляд і систематизацію актуальних наукових публікацій, визначення ключових тенденцій, викликів і можливостей для подальшого розвитку, а також аналіз клінічних, технічних та інноваційних аспектів використання ШІ у радіології, діагностиці й суміжних напрямках.

Теоретична частина. Для оцінювання актуальності досліджень методів машинного навчання та їх використання в дослідженні даного питання в наукометричній базі Scopus було сформульовано аналітичний запит, який включає ключові терміни, пов'язані з медичною візуалізацією, різними методами візуалізації, а також технологіями штучного інтелекту: (ALL("Medical imaging") OR ALL("Medical image") OR ALL("Medical visualization") OR ALL("Diagnostic imaging") OR ALL("Clinical imaging") OR ALL("Healthcare imaging") OR ALL("Radiological imaging") OR ALL("Biomedical imaging")) AND (ALL("MRI") OR ALL("CT Scan") OR ALL("Ultrasound") OR ALL("Nuclear medicine") OR ALL("Radiology") OR ALL("Image segmentation") OR ALL("Organ segmentation") OR ALL("Tumor segmentation") OR ALL("Lesion segmentation") OR ALL("Pathology detection") OR ALL("Anomaly detection") OR ALL("Tumor detection") OR ALL("3D modeling") OR ALL("3D visualization") OR ALL("Volumetric analysis") OR ALL("Organ reconstruction") OR ALL("Surgical planning") OR ALL("PET") OR ALL("SPECT") OR ALL("Radiography") OR ALL("X-ray fluorescence") OR ALL("X-ray") OR ALL("Fluoroscopy") OR ALL("Mammography") OR ALL("OCT") OR ALL("Spectroscopy")) AND (ALL("Artificial Intelligence") OR ALL("Machine Learning") OR ALL("Deep Learning") OR ALL("Neural Networks") OR ALL("Convolutional Neural Networks") OR ALL("U-Net") OR ALL("Image processing") OR ALL("Automated analysis") OR ALL("Pattern recognition"))).

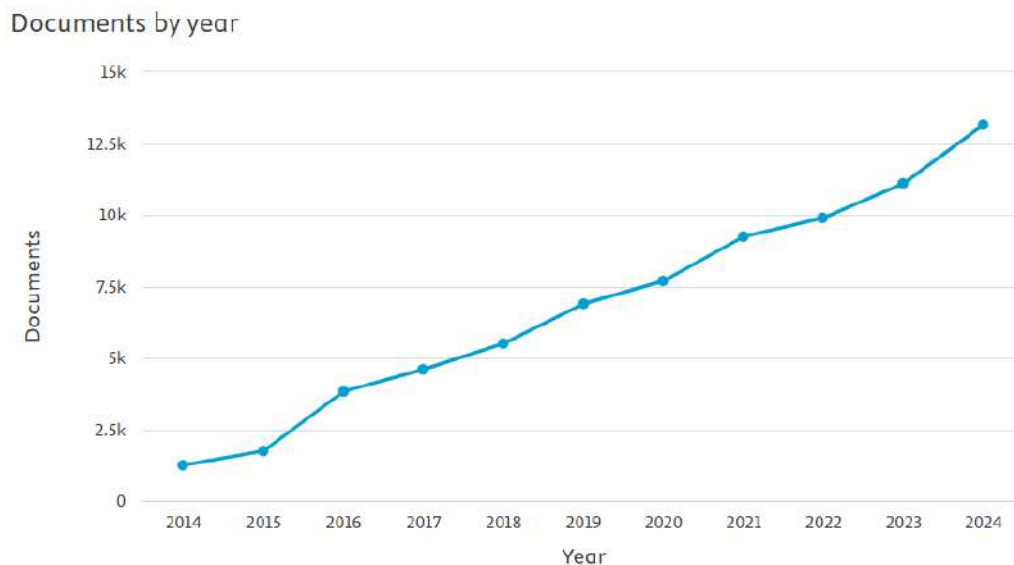


Рис.1 – Динаміка кількості наукових публікацій, присвячених застосуванню штучного інтелекту в медичній візуалізації (2014–2024)

На основі аналізу представленого графіка (рис. 1) спостерігається стійка тенденція зростання кількості наукових публікацій у період з 2014 по 2024 рік. Загальна кількість документів, що містять інформацію про застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації, демонструє експоненціальне зростання, що свідчить про зростаючий науковий інтерес до цієї тематики.

Зокрема, на початку аналізованого періоду (2014–2015 рр.) обсяг наукових робіт був відносно невеликим, проте вже з 2016 року спостерігається значне зростання. Подальший період (2017–2020 рр.) характеризується стабільним приростом кількості публікацій, що може бути пов'язано із впровадженням нових алгоритмів глибокого навчання, зокрема нейронних мереж. У 2021–2024 роках відзначається прискорення темпів зростання, що, ймовірно, є наслідком активного

застосування штучного інтелекту в клінічній практиці, появи високоточних методів аналізу зображень та розширення міжнародної співпраці в цій сфері.

Documents per year by source

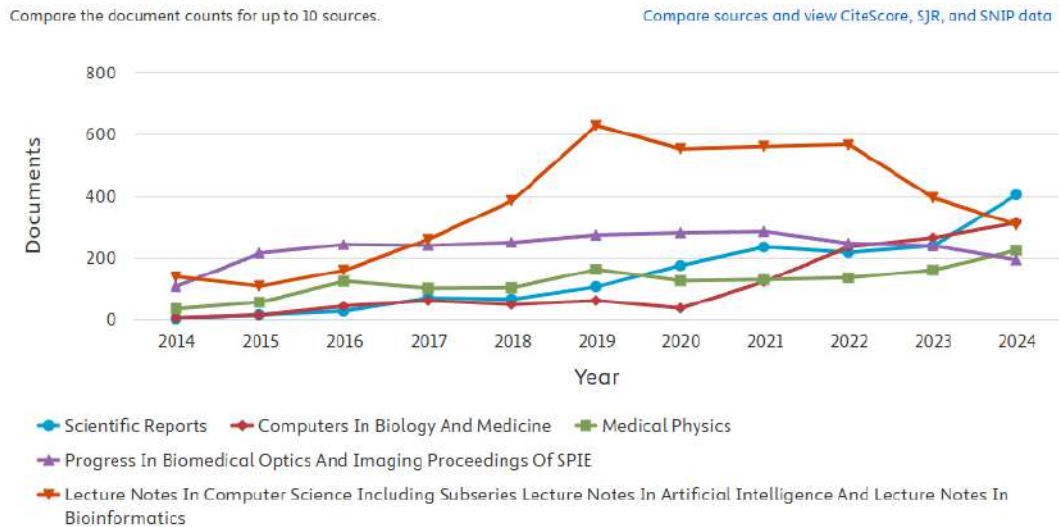


Рис.2 – Динаміка кількості наукових публікацій за джерелами у сфері застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації (2014–2024).

На наведеному графіку (рис. 2) зображено динаміку кількості наукових публікацій із тематики застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації (2014–2024), розподілених за п'ятьма джерелами: Scientific Reports (синя лінія), Computers in Biology and Medicine (червона), Medical Physics (зелена), Progress in Biomedical Optics and Imaging Proceedings of SPIE (фіолетова) та Lecture Notes in Computer Science (помаранчева). Видно, що у більшості джерел спостерігається загальна тенденція до зростання публікацій, але з різною інтенсивністю: наприклад, Computers in Biology and Medicine та Lecture Notes in Computer Science демонструють пікові значення близько 2019 року, після чого показники або знижуються, або стабілізуються, тоді як Scientific Reports нарощує обсяги поступово і в останні роки виходить на значно вищий рівень, а Medical Physics та Progress in Biomedical Optics and Imaging зберігають відносно рівний перебіг, відображаючи стабільний інтерес фахівців до цих напрямів досліджень.

Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.

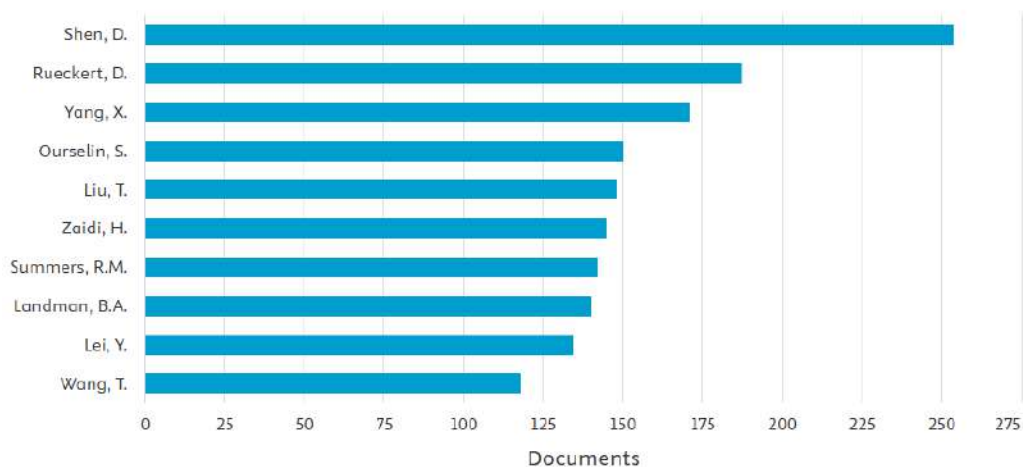


Рис.3 – Найпродуктивніші автори у сфері досліджень застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації за кількістю публікацій.

На стовпчиковій діаграмі (рис. 3) показано кількість наукових публікацій (по осі абсцис) для провідних авторів, які досліджують застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації (по осі

ординат). Лідером за кількістю документів є Shen D., чий показник перевищує 250 праць. Друге місце посідає Rueckert D. із приблизно 200 публікаціями. Далі йдуть Yang X. та Ourselin S., кожен із яких має понад 100 документів, проте помітно відстають від двох лідерів. Близькими за значеннями розмістилися Liu T., Zaidi H. і Summers R.M., їхні показники коливаються в межах 80–100 публікацій. Landman B.A. та Lei Y. демонструють дещо нижчу активність (близько 60–70 праць кожен), тоді як Wang T. (попри те, що зображений останнім у списку) сягає відмітки понад 100 публікацій, що свідчить про його вагомий внесок у дослідження ШІ в медичній візуалізації.

Documents by affiliation

Compare the document counts for up to 15 affiliations.

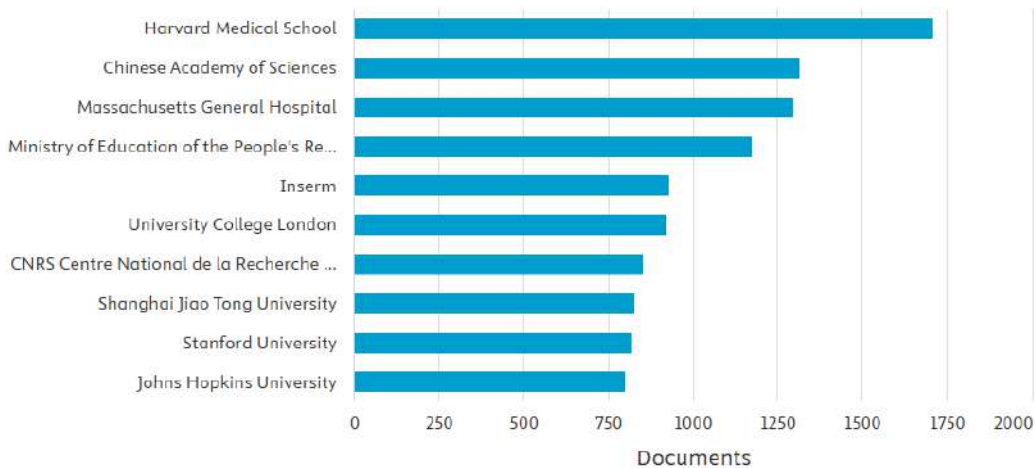


Рис.4 – Найпродуктивніші наукові установи у сфері досліджень застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації за кількістю публікацій.

На стовпчиковій діаграмі (рис. 4.) зображено кількість наукових публікацій, пов'язаних із застосуванням штучного інтелекту в медичній візуалізації, розподілених за провідними науковими установами (по осі ординат). Лідером серед них є Harvard Medical School із показником, що наближається до 2000 документів, за яким із відривом слідує Chinese Academy of Sciences. Приблизно схожі результати демонструють Massachusetts General Hospital та Ministry of Education of the People's Republic of China — кожен із них має показники в районі 1000–1200 публікацій. Дещо менші, але все одно вагомні обсяги дослідницьких праць спостерігаються у Inserm, University College London та CNRS. Решта університетів і дослідницьких установ, як-от Shanghai Jiao Tong University, Stanford University та Johns Hopkins University, мають подібний рівень активності, що свідчить про широке міжнародне залучення до досліджень штучного інтелекту у медичній візуалізації.

Documents by type

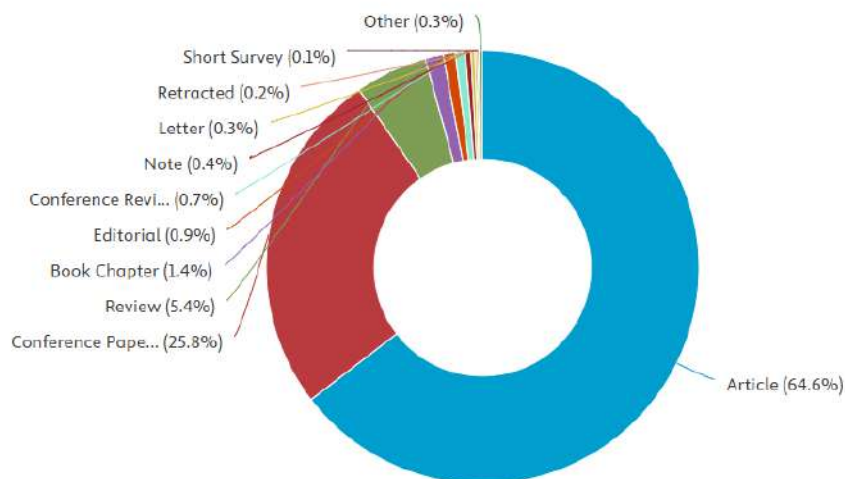


Рис.5 – Розподіл наукових публікацій за типами у сфері досліджень штучного інтелекту в медичній візуалізації.

На діаграмі (рис. 5) представлено розподіл публікацій про ШІ в медичній візуалізації за типами документів. Найбільшу частку (64,6%) становлять наукові статті, що є базовим форматом публікації результатів досліджень. Друге місце посідають тези конференцій (25,8%), підкреслюючи важливість наукових заходів для оперативного обговорення нових знахідок. Огляди (5,4%) свідчать про потребу в узагальненні знань, а розділи книг (1,4%) та редакційні статті (0,9%) доповнюють загальну картину ширшої наукової комунікації. Решта типів документів (зокрема, конференційні огляди, замітки, листи, відкликані публікації, короткі опитування та інші) сумарно не перевищують 2%, демонструючи доволі обмежене поширення у порівнянні з основними форматами.

Documents by subject area

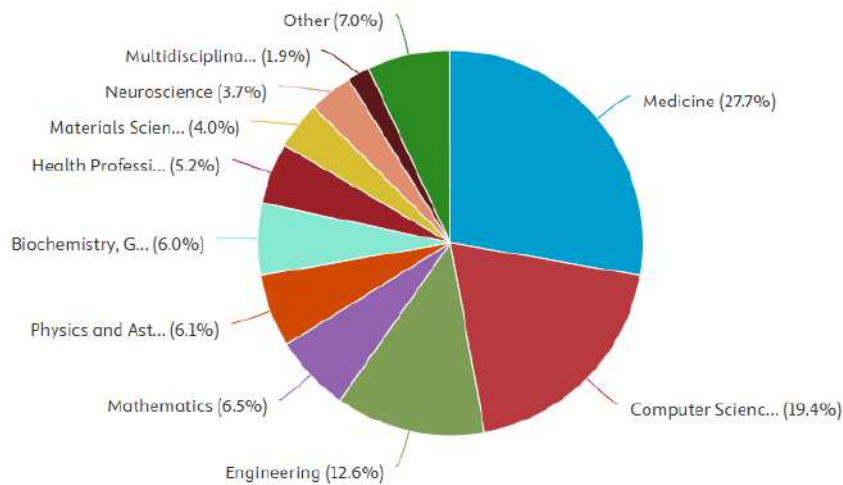


Рис.6 – Розподіл наукових публікацій за галузями знань у сфері досліджень штучного інтелекту в медичній візуалізації.

На круговій діаграмі (рис. 6) відображено розподіл наукових публікацій із тематики ШІ в медичній візуалізації за предметними областями. Найбільша частка (27,7%) належить медичним дисциплінам, що цілком логічно, зважаючи на домінування клінічних застосувань у цій сфері. Друге та третє місця посідають комп'ютерні науки (19,4%) та інженерія (12,6%), підкреслюючи важливість методів обчислювальної обробки зображень. Значущі частки припадають також на математику (6,5%), фізику та астрономію (6,1%) і біохімію, генетику та молекулярну біологію (6,0%), що свідчить про розмаїття міждисциплінарних підходів. Тим часом інші галузі (зокрема, нейронауки, матеріалознавство, мультидисциплінарні дослідження та ін.) сумарно становлять приблизно 16%, відображаючи широку зацікавленість у застосуванні штучного інтелекту для вирішення різноманітних наукових і практичних завдань.

На стовпчиковій діаграмі (рис. 7) зображено найбільших спонсорів досліджень, присвячених штучному інтелекту в медичній візуалізації, за кількістю пов'язаних публікацій. Лідерські позиції посідають National Institutes of Health (США) та National Natural Science Foundation of China, кожен із яких перевищує позначку 8000 документів. Дещо менша, але все ж вагома кількість публікацій припадає на U.S. Department of Health and Human Services і Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Наступними йдуть National Cancer Institute (США), European Commission, National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering та National Key Research and Development Program of China, а National Science Foundation і National Research Foundation of Korea демонструють відносно менші показники. Такий розподіл свідчить про активну фінансову підтримку з боку національних урядових агентств США та Китаю, а також міжнародних і європейських організацій, що забезпечує широкий масштаб досліджень і розробок у галузі штучного інтелекту для медичної діагностики.

Documents by funding sponsor

Compare the document counts for up to 15 funding sponsors.

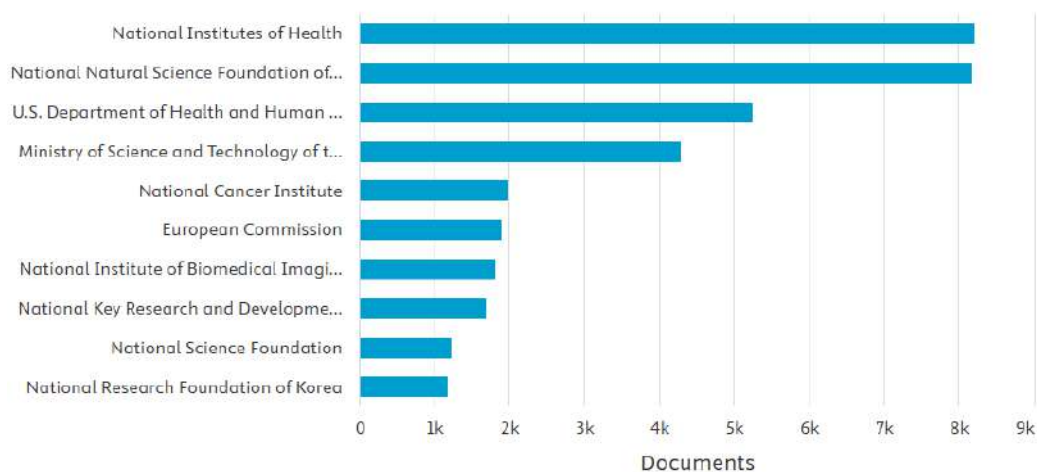


Рис.7 – Найбільші джерела фінансування досліджень у сфері застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації за кількістю публікацій.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

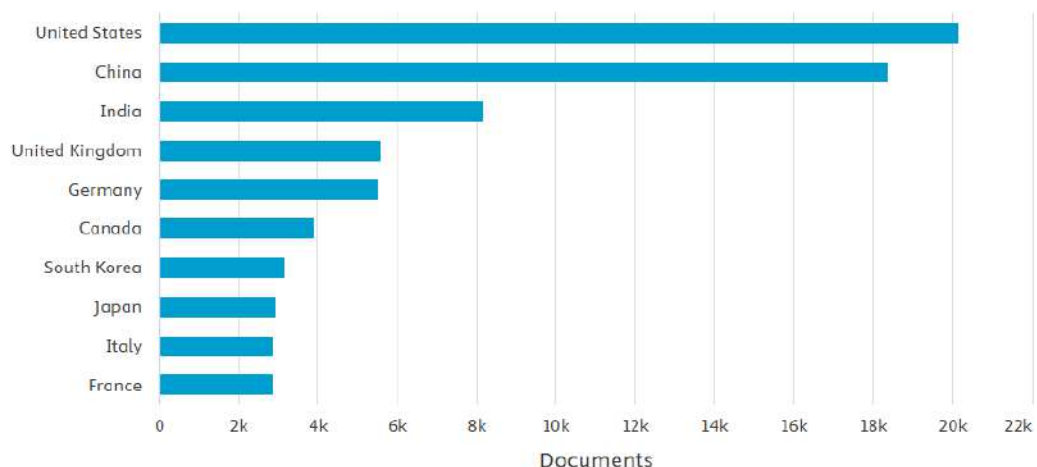


Рис.8 – Розподіл наукових публікацій у сфері застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації за країнами.

На стовпчиковій діаграмі (рис. 8) відображено кількість публікацій, присвячених штучному інтелекту в медичній візуалізації, розподілених за країнами/територіями. Лідером виступають Сполучені Штати з показником понад 20 тисяч документів, за ними йде Китай із приблизно 19 тисячами. Індія посідає третє місце (близько 10 тисяч), тоді як Велика Британія та Німеччина розміщуються на четвертій і п'ятій позиціях відповідно. Дещо менші, але все ж помітні обсяги публікацій спостерігаються у Канади, Південної Кореї, Японії, Італії та Франції, що вказує на активне залучення як великих, так і відносно менших науково-дослідницьких центрів із різних континентів.

Висновки. Проведене дослідження засвідчує динамічний розвиток сфери застосування штучного інтелекту в медичній візуалізації, про що свідчить експоненційне зростання кількості наукових публікацій протягом останнього десятиліття. Зазначені темпи зумовлені передусім стрімким прогресом у методах глибинного навчання, включно з алгоритмами згорткових нейронних мереж і трансформерів, а також розширенням обчислювальних можливостей. Вагомий внесок у дослідження вносять провідні університети та наукові установи США й Китаю, що підтверджується даними про розподіл публікацій і джерел фінансування (зокрема з боку National Institutes of Health та National Natural Science Foundation of China).

Незважаючи на відчутні досягнення, залишається низка важливих викликів: забезпечення надійності та відтворюваності результатів, підвищення інтерпретованості моделей і дотримання етичних норм, особливо щодо приватності даних пацієнтів. Подальші дослідження мають бути зосереджені на адаптації розроблених алгоритмів до широкої клінічної практики, інтеграції з різними видами медичних зображень та вдосконаленні методів комбінування мультидисциплінарних підходів (медицина, комп'ютерні науки, інженерія). Усе це створює передумови для формування більш надійних, чутливих і точних систем, здатних радикально підвищити ефективність діагностики й лікування пацієнтів.

Список бібліографічного опису

1. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical image analysis*, 2017, 42, pp. 60–88.
2. Добровська, Л. М., & Хімичук, А. Ю. Аналіз медичних зображень на базі згорткової нейронної мережі. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2018, 28(8), С. 123–128.
3. Висоцький, А. А., Суріков, О. О., & Василюк-Зайцева, С. В. Розвиток штучного інтелекту в сучасній медицині. *Український медичний часопис*, 2023, (2), С. 68–72.
4. Шатайло, В. А., & Черневський, Н. О. (2022). Використання штучного інтелекту в медицині: аналіз даних для діагностики та прогнозування захворювань. *Вісник Вінницького національного технічного університету*, (1), С. 68–72.
5. Pasricha, S. AI ethics in smart healthcare / *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2022, pp. 1-7. DOI:[10.1109/MCE.2022.3220001](https://doi.org/10.1109/MCE.2022.3220001)
6. Krittanawong, C., Zhang, H., Wang, Z., Aydar, M., & Kitai, T. Artificial intelligence in precision cardiovascular medicine. *Journal of the American College of Cardiology*, 2017, 69(21), pp. 2657–2664.
7. Карпенко, О. В., Карпенко, Ю. В., Кульгінський, Є. А. Застосування технологій штучного інтелекту у реформуванні сфери охорони здоров'я. *Державне управління: удосконалення та розвиток*, 2021, (11). DOI: [10.32702/2307-2156-2021.11.2](https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.11.2).
8. Абубакар, С. А., Сверстюк, А. Аналітичний огляд публікацій по методах машинного навчання в онкології та підхід до оцінювання їх якості / *Комп'ютерні системи та інформаційні технології*. 2024. - № 1, С. 6–16. Хмельницький національний університет. DOI: [10.31891/csit-2024-1-1](https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1).

References

1. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., ... & Sánchez, C. I. A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical image analysis*, 2017, 42, pp. 60–88.
2. Dobrovska, L. M., & Khimichuk, A. Yu. (2018). Analysis of medical images based on convolutional neural networks. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 28(8), pp. 123–128.
3. Vysotskyi, A. A., Surikov, O. O., & Vasyliuk-Zaitseva, S. V. (2023). The development of artificial intelligence in modern medicine. *Ukrainian Medical Journal*, (2), pp. 68–72.
4. Shataylo, V. A., & Chernevskyi, N. O. (2022). The use of artificial intelligence in medicine: Data analysis for disease diagnosis and prediction. *Bulletin of Vinnytsia National Technical University*, (1), pp. 68–72.
5. Pasricha, S. (2022). AI ethics in smart healthcare. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, pp. 1–7. DOI:[10.1109/MCE.2022.3220001](https://doi.org/10.1109/MCE.2022.3220001).
6. Krittanawong, C., Zhang, H., Wang, Z., Aydar, M., & Kitai, T. (2017). Artificial intelligence in precision cardiovascular medicine. *Journal of the American College of Cardiology*, 69(21), pp. 2657–2664.
7. Karpenko, O. V., Karpenko, Yu. V., & Kulhinskyi, Ye. A. The application of artificial intelligence technologies in the reform of the healthcare sector. *Public Administration: Improvement and Development*, 2021, (11). DOI: [10.32702/2307-2156-2021.11.2](https://doi.org/10.32702/2307-2156-2021.11.2).
8. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In *Computer systems and information technologies*. 2024, Issue 1, pp. 6–16. Khmelnytskyi National University. DOI: [10.31891/csit-2024-1-1](https://doi.org/10.31891/csit-2024-1-1).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-23>

УДК 004.056.5

Марковський Олександр Петрович, к.т.н., доцент.

<https://orcid.org/0000-0003-3483-4233>

Нікольський Сергій Сергійович, асистент

<https://orcid.org/0000-0003-4893-3339>

Національний університет "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м.Київ, Україна

МЕТОД ШВИДКОГО ОБЧИСЛЕННЯ ЕКСПОНЕНТИ НА ПОЛЯХ ГАЛУА $GF(2^n)$ ДЛЯ КРИПТОГРАФІЧНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

Марковський О.П., Нікольський С.С. Метод швидкого обчислення експоненти на полях Галуа $GF(2^n)$ для криптографічних застосувань. Розроблено метод прискореного обчислення експоненти на полях Галуа $GF(2^n)$, який реалізує групову обробку k розрядів коду експоненти з використання передобчислень, що дозволяє зменшити кількість операцій піднесення до квадрату та множення і, тим самим, прискорити процес обчислення. В теоретичному плані, запропонований метод базується на властивості операції експоненціювання числа на полях Галуа за умови, що код експоненти є ступенем числа два. Детально описано процедури побудови двох таблиць передобчислень, а також процедуру експоненціювання на полях Галуа з їх використанням. Виклад ілюстровано числовими прикладами.

Теоретично показано та експериментально доведено, що розроблений метод забезпечує прискорення обчислення експоненти на полях Галуа практично в k раз.

Ключові слова: мультиплікативні операції на полях Галуа, криптографічні алгоритми на основі алгебри полів Галуа, експоненціювання на полях Галуа, передобчислення.

Markovskiy O., Nikolskiy S. Method for fast exponential on Galose Fields $GF(2^n)$ calculation for cryptographic applications. The accelerated calculation method of the exponentiation one Galoise Fields $GF(2^n)$, which sells group processing k exponent code bits using precomputations for reducing the number of the square and multiplication operations and, thus, accelerate the calculation process. In the theoretical terms, the proposed method is based on the properties of the operation of exponentiation on Galoise Fields in case the code of exponent is the degree of number two. The procedures for constructing two precomputations tables, as well as the exponentiation on the Galoise Fields procedure with their use, are described in detail. The presentation is illustrated with numerical examples.

It is theoretically shown and experimentally proven that the developed method provides acceleration of the calculation of the exponential on Galoise Fields practically on k times.

Key words: multiplication operation on Galois fields, cryptographic algorithms based on Galois Fields algebra, Galois Fields exponentiation, precomputations.

Постановка наукової проблеми. Досягнуте в останнє десятиліття якісне зростання показників швидкодії та надійності Інтернету має наслідком розширення сфери застосування технологій IoT, яке вийшло на сьогоднішній день далеко за межі віддаленого управління побутовими приладами. Зримі переваги використання Інтернету в якості середовища обміну даних з готовою інфраструктурою, такі, як на порядки нижча вартість, висока гнучкість при реконфігуруванні, відсутність обмежень на відстань, стимулюють використання технологій IoT для побудови систем контролю та управління віддаленими об'єктами реального світу в багатьох галузях людської діяльності [1].

Сьогодні технології IoT знаходять широке застосування для віддаленого моніторингу стану здоров'я, об'єктів інфраструктури, дорожнього трафіку, в системах охоронної сигналізації і відео спостереження, а також для дистанційного управління технологічними процесами, транспортними засобами, тощо. При використанні Інтернету в якості середовища обміну даними в цих, та багатьох інших застосуваннях об'єктивно виникає потреба в організації захисту інформаційних потоків від зовнішнього втручання [2].

Для цього на практиці застосовується увесь арсенал сучасних механізмів криптографічного захисту. Для безпеки віддаленого моніторингу та управління на базі IoT найбільше значення мають механізми цифрового підпису, які гарантують автентичність як самих даних, так і їх відправників, в якості яких виступають компоненти системи керування. Базовою обчислювальною операцією цих механізмів виступає модулярне експоненціювання над числами, довжина яких на порядок перевищує розрядність процесора. Це зумовлене тим, що рівень захищеності напряму визначається розрядністю чисел, з якими оперують механізми цифрового підпису. На сьогодні, для більшості застосувань використовуються числа розрядністю 4096. Реалізація модулярного експоненціювання над такими довгими числами потребує сотень мільйонів процесорних операцій і, відповідно,

значних часових ресурсів. Для систем дистанційного управління, що працюють в реальному часі і, в яких в якості термінальних платформ використовуються малопотужні мікроконтролери, час перевірки автентичності команд є критичним. Це зумовлює практичну важливість пошуку шляхів прискорення реалізації механізмів цифрового підпису.

Одним із найбільш перспективних варіантів виступає перехід до альтернативних алгебраїчних базисів, в яких мультиплікативні операції над довгими числами виконуються на порядок простіше. Зокрема, мова йде про алгебру кінцевих полів Галуа $GF(2^n)$, яка широко використовується в механізмах цифрового підпису на базі ECC [3], а також при ідентифікації учасників віддаленої інформаційної взаємодії [4].

Таким чином, наукова задача прискорення комп'ютерної реалізації експоненціювання на полях Галуа є актуальною та має практичну значимість для сьогодишнього етапу розвитку інформаційних технологій.

Аналіз досліджень. Використання алгебри кінцевих полів Галуа $GF(2^n)$ в якості математичної основи побудови криптографічних систем з відкритим ключем, має певні переваги в порівнянні з традиційною модулярною арифметикою [5]. Насамперед, це суттєве спрощення всіх операцій: арифметичне додавання замінюється на логічне (XOR), яке позначається символом \oplus , арифметичне множення замінюється поліноміальним, яке позначається символом \otimes . В цих операціях не використовується перенос і, відповідно, розряди оброблюються автономно. Це спрощує і прискорює виконання цих базових операцій, особливо при апаратній реалізації.

Операція множення на полях Галуа $A \otimes B \text{ gem } P$ включає, крім поліноміального множення, редукцію отриманого добутку, тобто знаходження остачі поліноміального ділення добутку $A \otimes B$ на утворюючий поліном поля Галуа $P(x)$. Редукція на полях Галуа, яка позначається як 'gem', до певної міри являє собою аналог модулярної редукції, яка позначається як 'mod' [6]. Базовою для криптографічних застосувань операцією на полях Галуа виступає обчислення експоненти: $A^E \text{ gem } P$. Ця операція здійснюється над числами, довжина n яких забезпечує необхідний для задач практики рівень захищеності і визначається ступенем n утворюючого поліному $P(x) = x^n + p_n x^{n-1} + \dots + p_2 x + p_1$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$: $p_i \in \{0, 1\}$ поля Галуа. На сьогоднішній день для більшості застосувань використовується розрядність 4096 [7].

В силу того, що архітектура сучасних процесорів не пристосована до ефективного виконання мультиплікативних операцій в алгебрі полів Галуа, значна частина публікацій присвячена їх реалізації спеціалізованими апаратними засобами, в більшості випадків з використанням програмованих матриць [8, 9]. Простота та специфічні властивості операцій на полях Галуа дозволяють створювати апаратні засоби криптографічного захисту, які за показниками швидкодії значно перевершують аналоги, що реалізують базові операції криптографії з відкритим ключем в традиційній алгебрі.

Експоненціювання на полях Галуа, так само, як і модулярне експоненціювання, реалізується за одним із двох різновидів класичного алгоритму [10]. За цим алгоритмом процес обчислення організовано у вигляді n -кратного циклу, дії в рамках кожного j -того з яких, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, залежать від значення відповідного j -го двійкового розряду коду експоненти $E = e_n \cdot 2^{n-1} + e_{n-1} \cdot 2^{n-2} + \dots + e_2 \cdot 2 + e_1$, $e_j \in \{0, 1\}$. Згадані вище різновиди відрізняються напрямком проходження розрядів коду експоненти E . Так, якщо при виконанні n циклів індекс j номеру поточного біту коду експоненти E послідовно змінюється від n до одиниці, тобто від старших разрядів до молодших, класичний алгоритм передбачає використання лише однієї змінної R , яка перед початком циклів встановлюється в одиницю: $R=1$. В кожному циклі ця зміна спочатку підноситься до квадрату на полі Галуа: $R = R^2 \text{ gem } P$, а потім, за умови одиничного значення поточного біту коду експоненти E , множить на число A : якщо $e_j=1$ то $R=R \otimes A \text{ gem } P$. Після завершення циклів в змінній R сформовано значення $R=A^E \text{ gem } P$.

В другому різновиді класичного алгоритму, в якому розряди коду експоненти скануються в напрямку від молодших до старших, індекс j номеру поточного біту коду експоненти E послідовно змінюється від одиниці до n . Цей різновид класичного алгоритму обчислення експоненти на полях Галуа передбачає використання двох змінних: D та R , які на початку встановлюються рівними A та одиниці відповідно: $D=A$, $R=1$. В кожному циклі спочатку, за умовити, що поточний біт e_j коду E дорівнює одиниці, здійснюється множення на полі Галуа значення R на D : якщо $e_j=1$, то $R=R \otimes D \text{ gem } P$. Після цього, незалежно від значення e_j реалізується піднесення до квадрату змінної D : $D=D^2 \text{ gem } P$. Після завершення всіх n циклів в змінній R фіксується результат: $R=A^E \text{ gem } P$.

Реалізація обох різновидів класичного алгоритму потребує виконання, в середньому $1.5 \cdot n$ операцій множення на полі Галуа n -розрядних чисел.

Аналіз класичного алгоритму обчислення експоненти на полях Галуа свідчить про те, що він має послідовну структуру, яка виключає можливість розпаралелювання обчислень. Тому переважна більшість запропонованих на сьогоднішній день підходів направлені на прискорення базових його мультиплікативних складових: піднесення до квадрату на полях Галуа та множення на полях Галуа.

Ці операції мають в своєму складі дві фази: мультиплікативну, тобто обчислення поліноміального квадрату чи добутку та редукційну, яка полягає в обчисленні залишку поліноміального ділення результату мультиплікативної фази на утворюючий поліном поля Галуа. При застосуванні технології Монтгомері виконання обох зазначених вище фаз суміщається у часі [11].

Основний позитивний ефекти від такого суміщення полягає в тому, що довжина проміжних результатів практично не перевершує $n+1$, В той час, як при роздільній реалізації фаз поліноміального множення та редукції розрядність проміжного результату становить $2 \cdot n$. з огляду на те, що обробка здійснюється фрагментами, довжина r яких дорівнює розрядності процесора, оперування з майже вдвоє коротшими числами при суміщенні виконання фаз дозволяє суттєво прискорити мультиплікативні операції на полях Галуа.

Множення на полях Галуа $A \cdot B \text{ rem } P$ за методом Монтгомері організується у вигляді n циклів, з послідовною зміною його індексу j від 1 до n та формуванням результату в змінній R , стартові значення якої дорівнює нулю: $R=0$. В кожному j -тому циклі виконуються такі дії: якщо j -тий біт множника дорівнює одиниці, до поточного результату R логічно додається множене A : $R=R \oplus A$; якщо після цього молодший розряд R дорівнює одиниці, то до R логічно додається код утворюючого поліному P : $R=R \oplus P$; на кінець, код R зсувається на один біт праворуч: $R=R \gg 1$. Очевидно, що, в середньому, описана операція потребує $2 \cdot n$ логічних операцій над n -розрядними числами.

В якості основного резерву прискорення обчислення мультиплікативних операцій на кінцевих полях Галуа в відомих рішеннях застосовуються передобчислення, які дозволяють багатократно використовувати попередньо вираховані результати.

Зокрема, в криптографічних застосуваннях утворюючий поліном $P(x)$ поля Галуа $GF(2^n)$ є компонентою відкритого ключа і, відповідно, його можна вважати практично незмінним [6]. Це означає, що можна певним чином виокремити обчислення, які залежать тільки від $P(x)$, виконати їх лише один раз зі збереженням результатів в постійній пам'яті для їх використанні при кожному множенні на полях Галуа. Такий підхід використовується для прискорення виконання редукції.

Окремий клас складають відомі рішення до прискорення обчислення експоненти на полях Галуа, які базуються на властивості поліноміального квадрату $A \otimes A$. Ця властивість полягає в тому, що поліноміальний квадрат числа $A = a_n \cdot 2^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 2 + a_1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}: a_i \in \{0, 1\}$ може бути отриманий вставкою нулів між двійковими розрядами числа A . Іншими словами, $A \otimes A = a_n \cdot 2^{2(n-1)} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1$. В одному із відомих рішень [12] піднесення до квадрату на полі Галуа $A \otimes A \text{ rem } P$ зводиться до логічного додавання табличних значень $T[i] = 2^{2^i} \text{ rem } P$ для значень $i=1, 2, \dots, n$ для яких $a_i=1$. Очевидно, що в цьому варіанті піднесення до квадрату на полі Галуа потребує, в середньому, $n/2$ операцій логічного додавання (XOR). Відповідно, час обчислення експоненти на полях Галуа дорівнює $0.5 \cdot n^2 \cdot t_{\text{XOR}} + 0.5 \cdot n \cdot t_m$, де t_{XOR} – час виконання операції логічного множення, а t_m – множення на полі Галуа n -розрядних чисел. Головний недолік такого рішення полягає в використанні доволі значного для термінальних мікроконтролерів об'єму пам'яті для зберігання результатів передобчислень: n^2 бітів.

В роботі [13] запропоновано варіант використання властивості поліноміального квадрату для організації прискореного обчислення квадрату на полях Галуа. В силу того, що процес обчислення поліноміального квадрату не передбачає дій, пов'язані з аналізом множника, то корекція Монтгомері здійснюється з урахуванням значень двох розрядів поточного коду результату і, відповідно, зі зсувом відразу на два розряди. Відповідно цей метод передбачає для обчислення квадрату на полях Галуа з використанням $n/2$ циклів, в кожному з яких зі ймовірністю 0.75 виконується логічне додавання одного із трьох табличних значень і дві операції зсуву (поточного результату та числа, яке підноситься до квадрату). Тобто, в середньому, в рамках одного циклу здійснюється 2.75 операцій над n -розрядними числами, а всього, для операції піднесення до квадрату на полі Галуа – $1.375 \cdot n$. Перевага методу полягає в тому, що в таблиці передобчислень зберігається всього три n -розрядних числа.

В роботі [14] запропоновано більш узагальнену версію швидкого піднесення до квадрату на полі Галуа без множення, в якій редукція здійснюється відразу на k розрядів. Це вимагає створення таблиці передобчислень об'ємом $2^k(n+k)$ -розрядних чисел. В одному циклі виконується три операції над n -розрядними числами i , відповідно, загальна середня їх кількість для піднесення до квадрату на полі Галуа складає $3 \cdot n/k$. Оскільки в розглянутому методі час виконання множення на полі Галуа не змінюється, загальний час T_M виконання експоненціювання на полі Галуа становить:

$$T_M = \frac{3 \cdot n^2}{k} \cdot t_{XOR} + \frac{n}{2} \cdot t_m. \quad (1)$$

Якщо виходити з того, що операція множення на полях Галуа з використанням редукції Монтгомері потребує, в середньому, $2 \cdot n$ операцій типу логічного додавання чи зсуву n -розрядних чисел [13], тобто $t_m = 2 \cdot n \cdot t_{XOR}$, формула (1) може бути перетворена до вигляду:

$$T_M = \frac{3+k}{k} \cdot n^2 \cdot t_{XOR}. \quad (2)$$

Виділення невирішених задач. Проведений аналіз відомих рішень, направлених на прискорення комп'ютерної реалізації експоненціювання на полях Галуа показав, що всі вони, в переважній більшості, орієнтовані на зменшення часу виконання складових цієї операції: піднесення до квадрату та множення. Іншими словами, вони не змінюють кількості операцій в процесі обчислення експоненти на полях Галуа. Це суттєвим чином обмежує ефективність відомих методів в плані подальшого прискорення програмної реалізації важливої для криптографічних застосувань операції насамперед на малопотужних термінальних обчислювальних платформах, таких як мікроконтролери систем дистанційного контролю та управління на базі технологій IoT.

Мета досліджень полягає в прискоренні комп'ютерної реалізації обчислення експоненти на полях Галуа шляхом організації групової обробки розрядів коду експоненти з використанням передобчислень

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для досягнення поставленої мети запропоновано метод швидкого обчислення експоненти на кінцевих полях Галуа, який базується на організації групової обробки коду експоненти.

В основі пропонованого методу швидкого обчислення експоненти $A^E \bmod P$ на кінцевих полях Галуа $GF(2^n)$ лежить версія класичного алгоритму виконання цієї операції, яка передбачає сканування розрядів коду експоненти в напрямку від старших до молодших. Прискорення експоненціювання досягається за рахунок одночасної обробки відразу k розрядів коду експоненти. Для реалізації цієї ідеї запропоновано спеціальні таблиці передобчислень, перша із яких залежить лише від відтворюючого поліному $P(x)$ поля Галуа і дозволяє швидко виконувати піднесення числа R відразу в ступінь 2^k на полі Галуа $R^{2^k} \bmod P$ без обчислення проміжних ступенів: $R^2 \bmod P$, $R^4 \bmod P$, ..., $R^{2^{k-1}} \bmod P$. Друга таблиця передобчислень ступенів A залежить від числа A , яке постійне для кожного із циклів експоненціювання на полях Галуа. Ця таблиця забезпечує можливість суміщення групи операцій множення на постійне число A в рамках обробки k розрядів коду експоненти.

Перша таблиця U редукція ступенів двійки створюється при зміні утворюючого поліному $P(x)$, який є частинного відкритого ключа криптосистеми. На практиці останній змінюється відносно рідко, так, що за періоди між його оновленнями операція експоненціювання на полях Галуа виконується сотні тисяч і мільйони раз. Це означає, що час формування таблиці U практично не впливає на показники ефективності обчислення експоненти на полях Галуа.

Друга таблиця T передобчислень ступенів A залежить від числа A , яке змінюється при кожній операції обчислення експоненти $A^E \bmod P$, створюється перед початком циклу експоненціювання.

Для створення таблиці U передобчислень редукцій ступенів двійки, що містить $n-1$ n -розрядних чисел пропонується процедура, яка передбачає виконання наступної послідовності дій:

1. Індекс j встановлюється в одиницю: $j=1$; в першу комірку таблиці $U[1]$ заноситься код одиниці: $U[1] = 1$.
2. Індекс j збільшується на одиницю: $j=j+1$; якщо $j > n-1$, перехід на кінець;
3. j -тий елемент таблиці U заповнюється значенням $(U[j-1] \ll 2^k) \bmod P$ – залишком від поліноміального ділення на утворюючий поліном $P(x)$ поля Галуа зсунутого на 2^k розрядів ліворуч коду попереднього табличного значення $U[j-1]$: $U[j] = U[j-1] \cdot 2^k \bmod P$. Повернення на повторне виконання п.2.

Робота запропонованої процедури побудови таблиці передобчислень редукцій ступенів двійки ілюструється наступним прикладом. Нехай, $n=12$, а утворюючий поліном поля Галуа $GF(2^{12})$ має наступний вигляд: $P(x) = x^{12} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^2 + x + 1$. Цьому поліному відповідає числове значення $P=7079$. Кількість k розрядів коду експоненти E , що оброблюються одночасно, нехай дорівнює трьом: $k=3$. Відповідно до п.1. розробленої процедури, індекс j номеру рядка таблиці встановлюється в одиницю, а в перший рядок таблиці записується одиниця $U[1]=1$. Наступним п.2 процедури індекс j номеру рядка таблиці збільшується на одиницю і стає рівним двом. Згідно з п.3, код табличного значення $U[j]=U[2]$ формується як зсунутий на $2^k = 2^3 = 8$ двійкових розрядів код попереднього рядка таблиці $U[j-1]=U[1]$: $U[2]=U[1] \ll 8 = 1 \ll 8 = 256$. Через те, що цей код має розрядність меншу за $n=12$ $U[2] \bmod P = U[2]$. Аналогічним чином здійснюється заповнення наступного рядка $U[3]$ таблиці передобчислень: $U[3]=(U[2] \ll 8) \bmod P = U[2] \ll 8$. При формуванні табличного значення $U[4]$ довжина зсунутого на 8 розрядів коду $U[3]=2516$ перевищує n : $U[3] \ll 8 = 2516 \cdot 256 = 644096$. Тому над виконується редукція: обчислюється залишок від поліноміального ділення 644096 на $P=7079$: $U[4]=644096 \bmod 7079 = 3129$. Формування всіх наступних табличних значень $U[5], \dots, U[8]$ здійснюється аналогічним чином. Підсумкова таблиця передобчислень для заданих значень $P=7079$ та $k=3$ наведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Значення передобчислень U редукцій ступенів двійки для $P=7079$ та $k=3$

j	$U[j]$	j	$U[j]$	j	$U[j]$
1	1	5	2338	9	1508
2	256	6	3048	10	3099
3	2516	7	3960	11	1995
4	3129	8	2956	12	2045

Виходячи з того, що таблиця U містить n n -розрядних чисел, її об'єм становить n^2 біт.

Передбачена запропонованим методом швидкого обчислення експоненти на полях Галуа друга таблиця T передобчислень ступенів A містить 2^k n -розрядних чисел. Кожен j -тий із 2^k рядків таблиці $T[j], j \in \{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ містить залишки від ділення поліноміального номера j на A : $T[j]=A^j \bmod P$.

Процедура формування таблиці T передобчислень ступенів A зводиться до виконання наступної послідовності дій:

1. Табличні значення $T[0]$ та $T[1]$ встановлюється рівним відповідно одиниці та A : $T[0]=1$ та $T[1]=A$. Значення індексу i встановлюється рівним двійці: $i=2$.
2. Значення i -го рядка таблиці T заповнюється залишком від поліноміального ділення на утворюючий поліном P поля Галуа поліноміального добутку попереднього табличного значення на число A : $T[i] = (T[i-1] \otimes A) \bmod P$.
3. Значення індексу i збільшується на одиницю: $i=i+1$. Якщо $i < 2^k$, здійснюється перехід на повторне виконання п.2

Робота запропонованої процедури формування таблиці T передобчислень може бути ілюстрована наступним прикладом: нехай значення $A=4021$, $P=7079$, а $k=3$. При виконанні п.1 в перші два рядка таблиці заносяться коди одиниці та $A=4021$: $T[0]=1$ та $T[1]=4021$, а індекс i встановлюється рівним двом: $i=2$. В п.2 процедури наступне табличне значення $T[2]$ обчислюється у вигляді: $T[2]=(T[0] \otimes A) \bmod P = (4021 \otimes 4021) \bmod 7079 = 3888$. В рамках виконання п.3 значення i збільшується на одиницю, тобто стає рівним трьом: $i=3$. В силу того, що це значення менше $2^3=8$, здійснюється повторне виконання п.2. В подальшому заповнення таблиці відбувається аналогічним описаному чином. Результат – сформована таблиця T представлена в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати передобчислень T для значень $A=4021$, $k=3$, $P=7079$

j	$A^j \bmod P$	j	$A^j \bmod P$
0	0	4	3412
1	4021	5	1329
2	3888	6	3022
3	1221	7	3678

Пропонована процедура прискореного обчислення експоненти на полях Галуа $A^E \bmod P$ включає наступну послідовність дій:

1. За заданими значеннями A та P та обраним значенням k формується таблиця T передобчислень ступенів A , яка зберігається в пам'яті.

2. Стартове значення номеру j молодшого розряду поточного k -розрядного фрагменту коду експоненти E встановлюється рівним $j=n-k+1$. Стартове значення поточного коду R результату встановлюється рівним одиниці: $R=1$.

3. Індекс i номеру розряду поточного результату R встановлюється рівним одиниці: $i=1$. Початкове значення коду Q встановлюється рівним нулю: $Q=0$.

4. Якщо i -тий двійковий розряд r_i коду $R=r_1+r_2\cdot 2+r_3\cdot 2^2+\dots+r_n\cdot 2^{k-1}$, $\forall i \in \{1,2,\dots,n\}$; $r_i \in \{0,1\}$, поточного результату дорівнює одиниці: $r_i=1$, то до коду Q виконується логічне додавання (XOR) i -го значення таблиці $U[i]$ передобчислень: $Q=Q \oplus U[i]$.

5. Індекс i номеру розряду результату R збільшується на одиницю: $i=i+1$. Якщо після цього значення індексу i менше $n+1$: $i < n+1$, то здійснюється повернення на повторне виконання п. 4.

6. Виконується множення на полі Галуа обчисленого коду Q на табличне значення $T[f_j]$, яке адресується чисельним значенням $f_j = e_j + e_{j+1}\cdot 2 + \dots + e_{j+k-1}\cdot 2^{k-1}$ поточного j -го фрагменту коду експоненти E зі збереженням результату в R : $R = Q \otimes T[f_j] \text{ rem } P$.

7. Здійснюється перехід до обробки наступного k -розрядного фрагменту коду експоненти E шляхом зменшення номеру j молодшого розряду поточного фрагменту на величину k : $j = j - k$. Якщо після цього $j > 0$ реалізується повернення на повторне виконання п. 3.

8. Кінець. Результат обчислення експоненти на полі Галуа зафіксовано в змінній R : $R=A^E \text{ rem } P$.

Робота запропонованої процедури швидкого експоненціювання на полях Галуа може бути ілюстрована прикладом обчислення $4021^{3758} \text{ rem } 7079 = 2185$. Відповідно, утворюючий поліном $P(x) = x^{12} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^2 + x + 1$, який співвідноситься з числом $P=7079$, формує поле Галуа $GF(2^{12})$ 12-розрядних чисел, тобто $n=12$. Число, над яким виконується експоненціювання $A=4021$, код експоненти $E=3758$, розряди якої оброблюються фрагментами по три розряди, тобто $k=3$.

Оскільки в рамках прикладу поле Галуа утворено поліномом $P(x) = x^{12} + x^{11} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^2 + x + 1$, то для експоненціювання використовується наведена в таблиці 1 значення передобчислень.

В ході виконання п.1 запропонованої процедури формуються наведені в таблиці 2 передобчислення T , які залежить від значення $A=4021$ та довжини фрагменту $k=3$.

Згідно п.2 значення номеру j молодшого розряду поточного фрагменту експоненти E встановлюється рівним $j=n-k+1 = 12-3+1=10$. Значення R встановлюється рівним одиниці: $R=1$.

У відповідності з п.3 процедури, індекс i номеру розряду поточного результату R встановлюється рівним одиниці: $i=1$, а код Q обнуляється: $Q=0$.

В силу того, що $R=1$, при $i=1$ в п.4 до коду Q додається рівне одиниці значення $U[1]$, в результаті чого Q стає рівним одиниці. При всіх інших значеннях індексу i від 2-х до 12-ти, значення Q не змінюється оскільки відповідні розряди R дорівнюють нулю.

Наступним п.6 одиничне значення Q множиться на табличне значення $T[f_j]$, яке адресується кодом 3-х старших розрядів експоненти E , який дорівнює $f_j = 7 (111_2)$, в результаті чого в змінну R заноситься код $R = Q \otimes T[7] \text{ rem } P = 1 \otimes 3678 \text{ rem } 7079 = 3678$. Значення j зменшується на $k=3$: $j=j-k = 10-3 = 7$. Оскільки це значення більше нуля, здійснюється перехід на повторне виконання п.3.

В рамках реалізації п.3-4, індекс i змінюється від 1 до 12 і в змінній Q формується логічна сума табличних значень U , які співвідносяться з одиничними компонентами двійкового коду R . В силу того, що поточне значення $R=3678 = 1110\ 0101\ 1110_2$, обчислений в циклі виконання в п.3-4 код Q являє собою логічну суму: $Q = U[2] \oplus U[3] \oplus U[4] \oplus U[5] \oplus U[7] \oplus U[10] \oplus U[11] \oplus U[12] = 256 \oplus 2516 \oplus 3129 \oplus 2338 \oplus 3960 \oplus 3099 \oplus 1995 \oplus 2045 = 3738$.

Наступним п.6 обчислене значення $Q = 3738$ множиться на табличне значення $T[f_j]$, яке адресується кодом, утвореним 7-м, 8-м і 9-м розрядами експоненти E , який при $e_9=0, e_8=1, e_{10}=0$ дорівнює $f_j = 2 (010_2)$. Відповідно виконується множення на полі Галуа: $R = Q \otimes T[2] \text{ rem } P = 3738 \otimes 3888 \text{ rem } 7079 = 3420$.

В подальшому, обробка другого та першого фрагментів коду експоненти E здійснюється по аналогії. В таблиці 3 наведена покрокова динаміка трансформацій змінних процедури.

Таблиця 3. Динаміка покрокових значень змінних процедури

j	f_j	Q	R
10	$111_2=7$	1	$1 \otimes 3678 \text{ rem } 7079 = 3678 = 1110\ 0101\ 1110_2$
7	$010_2=2$	3738	$3738 \otimes 3888 \text{ rem } 7079 = 3420 = 1101\ 0101\ 1100_2$
4	$101_2=5$	1637	$1637 \otimes 1329 \text{ rem } 7079 = 253 = 1111\ 1101_2$

1	110 ₂ =6	978	978⊗3022 rem 7079= 2185
---	---------------------	-----	-------------------------

В запропонованому методі для обчислення $R=A^E$ gem P використовується, в середньому, $0.5 \cdot n^2/k$ операцій логічного додавання (XOR) n -розрядних чисел та n/k операцій множення чисел такої довжини на полі Галуа.

Операція множення n -розрядних чисел на полі Галуа складається з власне поліноміального множення та редукції (отримання залишку від поліноміального ділення на утворюючий поліном P поля Галуа) отриманого добутку. Перша частина зводиться до n -кратного виконання двох операцій: логічного додавання (за умови одиничного значення поточного розряду множника) та зсуву. Враховуючи, що час виконання цих логічних операцій для переважної більшості процесорів близький за значенням, можна вважати, що поліноміальне множення потребує виконання $1.5 \cdot n$ операцій логічного додавання. Поліноміальне ділення потребує для реалізації, в середньому, $n/2$ логічних додавань та n зсувів. В цілому, час множення на полях Галуа оцінюється витратами часу на виконання $3 \cdot n$ операцій логічного додавання n -розрядних чисел.

З урахуванням наведеного, час T обчислення експоненти на полях Галуа в запропонованому методі може бути оцінений витратами часу на реалізацію $T = 0.5 \cdot n^2/k + 1.5 \cdot n^2/k = 2 \cdot n^2/k$ логічних додавань.

При використанні одного із двох різновидів класичного алгоритму експоненціювання на полях Галуа, потрібно реалізувати $1.5 \cdot n$ операцій множення на полях Галуа n -розрядних чисел, або $2.25 \cdot n^2$ операцій логічного додавання n -розрядних чисел. Іншими словами, час T_C обчислення експоненти на полі Галуа за класичним алгоритмом становить $T_C = 2.25 \cdot t_{XOR}$. Тобто, в порівнянні з класичним алгоритмом обчислення експоненти на полях Галуа, запропонований метод дозволяє прискорити її реалізацію в β_C раз, при тому, що чисельне значення β_C визначається формулою:

$$\beta_C = \frac{T_C}{T} = \frac{2.25 \cdot n^2}{2 \cdot \frac{n^2}{k}} = 1.125 \cdot k \quad (3)$$

На практиці значення коефіцієнту β_C пропорційне значенню k , яке обмежується об'ємом пам'яті для зберігання результатів передобчислень. Оскільки таблиця U передобчислень редукцій ступенів двійки залежить тільки від утворюючого поліному $P(x)$ поля Галуа, який є частиною відкритого ключа i , відповідно, незмінний, для її зберігання може бути використана вбудована флеш-пам'ять мікроконтролера. Як зазначалося вище, об'єм таблиця U становить n^2 біт, що при значенні $n=4096=2^{12}$ складає 2^{24} біти або 2^{21} байти (2 Мбайти). Тобто, об'єм вбудованої флеш-пам'яті більшості сучасних термінальних мікроконтролерів, таких, зокрема як ARM Cortex-M чи PIC, цілком дозволяє зберігати таблицю U передобчислень.

Таблиця T об'ємом $2^k \cdot n$ біт, формується безпосередньо перед кожним обчисленням експоненти A^E gem P і, відповідно, має зберігатися в оперативній пам'яті. Враховуючи, що об'єм оперативної пам'яті сучасних мікроконтролерів становить 256-512 Кбайт (2^{21} - 2^{22} біт), при $n=4096$, граничне значення k визначається як $\log_2 2^{21}/2^{12} = 9$. В рамках проведених експериментальних досліджень використовувалося $k=8$, що забезпечило реальне прискорення обчислення експоненти по полі Галуа в 8.5 раз.

Якщо порівнювати запропоноване рішення, яке полягає в одночасній обробці k розрядів коду експоненти з відомим [14], в якому організується одночасна обробка k розрядів числа, при його піднесенні до квадрату, то відповідне значення коефіцієнту β_k прискорення визначається у наступному вигляді:

$$\beta_k = \frac{T_M}{T} = \frac{(3+k) \cdot n^2}{2 \cdot n^2} = 1.5 + \frac{k}{2} \quad (4)$$

Це означає, що при однакових значеннях $k=8$, запропонований метод забезпечує прискорення обчислення експоненти на полях Галуа в п'ять раз.

Висновки. В результаті досліджень, направлених на прискорення комп'ютерної реалізації механізмів захисту інформації на базі криптографії з відкритим ключем, в основі яких лежить алгебра кінцевих полів Галуа $GF(2^n)$, теоретично обґрунтовано, розроблено та досліджено метод прискореного обчислення експоненти.

Запропонований метод експоненціювання над полях Галуа, який відрізняється організацією групової обробки розрядів коду експоненти з використання передобчислень, що дозволяє зменшити

кількість мультиплікативних операцій піднесення до квадрату та множення і, тим самим, прискорити процес обчислення.

В основу методу покладено властивості операції експоненціювання числа на полях Галуа за умови, що код експоненти є ступенем числа два. Ці властивості дозволяють об'єднати групу операцій піднесення до квадрату на полі Галуа, якщо число елементів в групі є ступенем числа два. З використанням цього в рамках запропонованого методу організовано одночасну обробку груп із k розрядів коду експоненти.

Теоретично показано та експериментально доведено, що розроблений метод забезпечує прискорення обчислення експоненти на полях Галуа практично в k раз. При цьому значення k обмежується ресурсами пам'яті комп'ютерної платформи для зберігання таблиць передобчислень. Зокрема при використанні в якості такої платформи термінальних мікроконтролерів досягнуто прискорення обчислення в 8.5 раз.

Розробка орієнтована для швидкої реалізації криптографічних механізмів захисту від зовнішнього втручання в роботу систем віддаленого контролю та управління, в яких якості середовища обміну даними використовується Інтернет.

Список бібліографічного опису:

1. Kopetz H. Internet of Things /H.Kopetz, W. Steiner// Real-Time Systems. Springer, Cham.-2022.-P.325-341. DOI: 10.1007/978-3-031-11992-7_13.
2. Rayer A. Internet of Things Security and Privacy /A.Rayer, S.Salam // Internet of Things from Hype to Reality. Springer, Cham.-2022.- P.213-246. DOI:10.1007/978-3-030-90158-5_8.
3. Rezaei A. A New Finite Field Multiplication Algorithm to Improve Elliptic Curve Cryptosystem Implementations / Abdalhossein Rezaei, Parviz Keshavarzi // Journal of Information Systems and Telecommunication, - 2013.-Vol. 1, No. 2, P.119-129.
4. Марковський О.П. Використання алгебри полів Галуа для реалізації концепції «нульових знань» при ідентифікації та автентифікації віддалених / О.П.Марковський, Захаріюдакіс Ліфтеріс, Максимук В.Р. // Електронне моделювання. Збірник наукових праць. - 2017.- Т.6, №39. - С.33-45.
5. Калмиков І.А. Розробка методу нелінійного шифрування інформації з використанням операції піднесення до степеня для кінцевого поля Галуа / І.А. Калмиков, Е.С. Степанова, К.Т. Тинчеров// Сучасні наукові технології. — 2019.- № 9.- 2019. - С.84—89.
6. Daiko I. Fast exponential method on Galois fields for cryptographic applications / Ihor Daiko, Victor Selivanov // 13-th International Conference on Dependable system, Service and Technologies DESSERT-2023,13-15 October, Greece, Athens. 2023.- P.648-650. DOI :10.1109/DESSERT61349.2023.10416519.
7. Русанова О.В. Метод розподіленого модулярного експоненціювання на термінальних мікроконтролерах IoT із захищеним залученням хмарних обчислень / О.В. Русанова, М.А. Гайдукевич // Проблеми управління та інформатизації - 2024.- № 2 (78).- С.91-103. DOI: 10.18372/2073-4751.78.18966.
8. Fitzpatrick P. Algorithm and Architecture for a Galois Fields multiplicative Arithmetic Processor/ P. Fitzpatrick, Popovici E. M. // IEEE Trans. on Information Theory. — 2003— V.49, - № 12, — P. 3303— 3307.
9. Жолубак І. Аналіз алгоритмів множення в полях Галуа для криптографічного захисту інформації / Bulletin of the Lviv Polytechnic National University "Information systems and networks"-2023.- Вип.13.- С.338-349. DOI: 10.23939/sisn2023.13.338.
10. Николайчук Я.М. Коды полів Галуа: теорія і застосування / Я.М. Николайчук //Тернопіль.-Вид-во ТНУ. — 2012. - 576 с.
11. Osadchyy V. The Order of Edwards and Montgomery Curve / V.Osadchyy // WSEAS Transactions on Mathematics, - 2020.- Vol. 19.- № 25, - P. 253-264.
12. Wu H. Finite field multiplier using redundant representation/ H. Wu, M.A. Hasan, I.F. Blake, S.Gao // IEEE Trans. Computers. —2002 — V.51,- № 51. — P. 1306 — 1316.
13. Марковський О.П. Метод швидкого експоненціювання на полях Галуа для систем криптографічного захисту інформації / О.П. Марковський, І.В. Дайко // Проблеми управління та інформатизації - 2024.- № 1 (77.- С.80-88. DOI: 10.18372/2073-4751.77.18660
14. Al-Mrayt Ghassan Abdel Jalil Halil. Organization of fast exponentiation on Galois Fields for cryptographic data protection systems / Al-Mrayt Ghassan Abdel Jalil Halil, O. Markovskiy, A. Stupak // Information, Computing and Intelligent systems. – 2022. – № 3.- P.17-25. DOI: 10.20535/2708-4930.3.2022.

References:

1. Kopetz H. Internet of Things /H.Kopetz, W. Steiner// Real-Time Systems. Springer, Cham.-2022.-P.325-341. DOI: 10.1007/978-3-031-11992-7_13.
2. Rayer A. Internet of Things Security and Privacy /A.Rayer, S.Salam // Internet of Things from Hype to Reality. Springer, Cham. 2022.- P.213-246. DOI:10.1007/978-3-030-90158-5_8.
3. Rezaei A. A New Finite Field Multiplication Algorithm to Improve Elliptic Curve Cryptosystem Implementations / Abdalhossein Rezaei, Parviz Keshavarzi // Journal of Information Systems and Telecommunication, - 2013.-Vol. 1, No. 2, P.119-129.

4. Markovskiy O.P. Galois Fields Algwbra Utilization for Implementation of the Conception of Zero-Knowledge Under Identification and Authentication of Remote Users / O.P. Markovskiy, Zacharioudakis Leftherios, V.R. Maksymuk // *Electronic Modeling*.-2017.- Vol.6.- №39. - P.33-45.
5. Kalmikov I.A. Rozrobka metody nelinejnogo shifruvannja informacii z vikoructannjam operacij pidnesennja do stepeni dlja kincevogo polja Galua /I.A.Kalmikov, E.C.Stepanova, K.T.Tincherov// *Sychasni Naukomisni tehnologiji*. — 2019.- № 9.- 2019. - C.84—89.
6. Daiko I. Fast exponential method on Galois fields for cryptographic applications / Ihor Daiko, Victor Selivanov // 13-th International Conference on Dependable system, Service and Technologies DESSERT-2023,13-15 October, Greece, Athens.-2023.- P.648-650. DOI :10.1109/DESSERT61349.2023.10416519.
7. Rusanova O.V. Method of distributed modular exponentiation on IoT terminal micrcontrollers with protected involvement of cloud computing / O.V.Rusanova, M.A. Haidukevych // *Problems of Informatization and Managements*.- 2024.- № 2 (78).- P.91-103. DOI: 10.18372/2073-4751.78.18966.
8. Fitzpatrick P. Algorithm and Architecture for a Galois Fiels multiplicative Arithmetic Processor./ P. Fitzpatrick, Popovici E. M. // *IEEE Trans. on Information Theory*. — 2003— V.49, - № 12, — P. 3303— 3307.
9. Golubak I. Analysis of multiplication algorithms on Galoise Fields for cryptographic data protection / *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University "Information systems and networks"* -2023.- Ed.13.- P.338-349. DOI: 10.23939/sisn2023.13.338.
10. Nikolajchuk J.M. Kodi poliv Galua: teorija i zstosuvannja / J.M. Nikolajchuk // *Ternopil.-Ed TNY*. —2012. - 576 c.
11. Osadchyy V. The Order of Edwards and Montgomery Curve / V.Osadchyy // *WSEAS Transactions on Mathematics*, - 2020.- Vol. 19.- № 25, - P. 253-264.
12. Wu H. Finite field multiplier using redundant representation./ H. Wu, M.A. Hasan, I.F. Blake, S.Gao // *IEEE Trans. Computers*. —2002 — V.51,- № 51. — P. 1306 — 1316.
13. Markovskiy O.P. Method of fast exposure in Galoise Fields in cryptographic data protection systems // O.P. Markovskiy, I.V. Daiko // *Problems of Informatization and Managements*.- 2024.- № 1 (77).- P.80-88. DOI: 10.18372/2073-4751.77.18660
14. Al-Mrayt Ghassan Abdel Jalil Halil. Organization of fast exponentiation on Galois Fields for cryptographic data protection systems / Al-Mrayt Ghassan Abdel Jalil Halil, O. Markovskiy, A. Stupak // *Information, Computing and Intelligent systems*. – 2022. – № 3.- P.17-25. DOI: 10.20535/2708-4930.3.2022

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-24>

УДК 004.41:519.876.5

Васьків Роман Ігорович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-8549-5035>

Веретеннікова Наталія Вячеславівна, к.н.соц.к., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-9564-4084>

Національний університет «Львівська політехніка», м Львів, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ «ІНЖЕНЕРІЯ ХАОСУ» ТА СТІЙКІСТЬ РОЗПОДІЛЕНИХ ІТ-КОМАНД

Васьків Р.І., Веретеннікова Н.В. Методологія «Інженерія хаосу» та стійкість розподілених ІТ-команд. У статті досліджено застосування принципів методології «Інженерія хаосу» для підвищення стійкості розподілених ІТ-команд шляхом вдосконалення управління ризиками та оптимізації проектних процесів. Розроблено математичну модель, яка дозволяє кількісно оцінювати ключові параметри, зокрема часову затримку, комунікаційні бар'єри, стабільність інформаційних систем, функціональну розподіленість, ефективність проксі-ролей та рівень змінності команди. Модель передбачає дискретний аналіз у часових інтервалах, що дає змогу оцінювати динаміку змін і вплив ризиків на продуктивність розподілених команд. Особлива увага приділена методології моделювання збоїв, яка включає імітацію критичних сценаріїв для тестування стійкості системи в умовах високої невизначеності. Запропоновані теоретичні та практичні підходи сприяють вдосконаленню методів управління ризиками в умовах сучасних динамічних ІТ-середовищ.

Ключові слова: методологія «Інженерія хаосу», управління ризиками, розподілені ІТ-команди, комунікаційні бар'єри, стабільність систем, проксі-ролі, оптимізація проектних процесів.

Vaskiv R., Veretennikova N. Chaos Engineering methodology and the resilience of distributed IT teams. The paper explores the application of Chaos Engineering methodology to enhance the resilience of distributed IT teams through improved risk management and project process optimization. A mathematical model has been developed to quantitatively assess key parameters, including latency, communication barriers, information system stability, functional distribution, proxy role efficiency, and team variability. The model employs discrete interval analysis, enabling the evaluation of dynamic changes and the impact of risks on the performance of distributed teams. Special attention is given to failure modeling methodology, which incorporates the simulation of critical scenarios to test system resilience under high uncertainty conditions. The proposed theoretical and practical approaches contribute to advancing risk management methods in contemporary dynamic IT environments.

Keywords: Chaos engineering methodology, risk management, distributed IT teams, communication barriers, system stability, proxy roles, project process optimization.

Постановка наукової проблеми. У сучасному трансформаційному середовищі розподілені ІТ-команди набувають дедалі більшого значення, забезпечуючи доступ до кращих талантів, оптимізацію витрат та гнучкість у реалізації проектів. За даними Баффер, після пандемії COVID-19 понад 70% компаній впровадили гібридну або повністю віддалену модель роботи, причому в ІТ-секторі ця тенденція проявляється особливо яскраво [1]. Дослідження Гартнера показує, що технологічні компанії є лідерами у впровадженні розподілених команд та віддалених форматів роботи [2]. Водночас такі команди стикаються з унікальними викликами, зокрема соціокультурними, часовими, географічними, технічними та функціональними бар'єрами, які можуть негативно впливати на їхню продуктивність і стійкість. Важливою складовою успіху розподілених команд є здатність забезпечувати ефективне використання інформаційних та комунікаційних технологій, які відіграють ключову роль у взаємодії учасників та координації проектних процесів.

Ризики, з якими стикаються розподілені команди, мають багатовимірний характер. Географічна розподіленість команди може спричинити затримки у прийнятті рішень через різницю в часових поясах, що обмежує можливість синхронної взаємодії. Соціокультурні відмінності — різниця у ментальності, мовах, традиціях і робочих підходах — можуть викликати непорозуміння, напругу та зниження рівня взаємодії. За даними Інституту проектного менеджменту (Project Management Institute), до 40% проектів у розподілених командах зазнають значних затримок саме через комунікаційні бар'єри [3].

Функціональна розподіленість є ще одним важливим викликом. У межах таких команд кожен учасник має чітко визначені ролі, зони відповідальності та завдання, які можуть виконуватись паралельно або послідовно. Це підвищує ефективність роботи, але водночас створює складнощі в координації, узгодженні пріоритетів і запобіганні конфліктам між функціональними підрозділами. Невдале управління функціональною розподіленістю може призводити до дублювання зусиль, або помилок через недостатню комунікацію та значного зниження продуктивності команди.

Окрім цього, залежність від стабільності інформаційних систем та надійності комунікаційних технологій залишається критичним аспектом. Збоїв в цих системах можуть посилювати негативні

наслідки розподіленої роботи, спричиняючи зриви у виконанні проектних завдань. Технічні збої та неефективна комунікація можуть суттєво впливати на продуктивність розподілених команд, спричиняючи затримки та перевищення бюджетів. Згідно з дослідженням Ш. Фукс, Дж. Новікке, Г. Струбе, великі проекти в різних галузях зазвичай завершуються на 20% пізніше запланованого терміну та з перевищенням бюджету на 80% [4]. Крім того, за даними Інституту проектного менеджменту, неефективна комунікація є причиною невдачі проектів у третині випадків [5].

Важливою складовою цих викликів є управління ризиками, які невід'ємно супроводжують проекти в умовах високої невизначеності та складності. Ризик в управлінні ІТ-проектами визначається як невизначена подія або умова, яка, якщо виникне, матиме позитивний або негативний вплив на принаймні одну з цілей проекту, таких як час, вартість, якість або обсяг робіт [6].

Ідентифікація ризиків та їхніх чинників вважається ключовим етапом управління ризиками [7, 8], який широко використовують як у гнучких, так і в традиційних підходах до розробки програмного забезпечення [9]. Фактор ризику визначається як умова, яка може становити серйозну загрозу для успішного завершення проекту з розробки програмного забезпечення [10]. Неефективність процесу ідентифікації ризиків при розробці складних систем вважається однією з основних причин невдач проектів [11]. Низка досліджень вказує на те, що фактично існує прямий зв'язок між управлінням ризиками та успіхом або покращенням ефективності проектів з розробки програмного забезпечення [12, 13, 14, 15, 16, 17]. Ці дослідження показують, що фактори ризику повинні бути ідентифіковані та добре контрольовані для того, щоб проекти досягли своїх цілей. Таким чином, ідентифікація факторів ризику відіграє вирішальну роль в успіху та ефективності проектів з розробки програмного забезпечення.

Посібник із зведення знань з управління проектами (PMBOK Guide) підкреслює важливість проактивного підходу до управління ризиками, що включає ідентифікацію, аналіз, планування заходів реагування та моніторинг ризиків протягом життєвого циклу проекту [6]. Характерною рисою ризиків в ІТ-проектах є їхній ефект взаємозалежності, коли один ризик може спричинити каскад інших.

Методологія «Інженерія хаосу» (Chaos Engineering), як дисципліна, спрямована на тестування систем шляхом моделювання реальних збоїв, відкриває нові можливості для підвищення стійкості розподілених команд. Завдяки цілеспрямованим експериментам, які дозволяють імітувати непередбачувані сценарії, можна ідентифікувати вузькі місця у використанні інформаційних систем і комунікаційних технологій, а також оцінити здатність команди до адаптації в умовах невизначеності. Методологія «Інженерія хаосу» дозволяє не лише виявити потенційні проблеми, але й оцінити ефективність розроблених рішень, створюючи основу для формування стійких і надійних проектних процесів навіть за умов географічної, часової та функціональної розподіленості.



Рис. 1 – Етапи створення експерименту в методології «Інженерія хаосу» для тестування стійкості розподілених систем

Побудова експерименту в межах методології «Інженерія хаосу» (рис. 1) є структурованим процесом, спрямованим на моделювання потенційних збоїв у системах для перевірки їхньої стійкості. Даний процес включає такі етапи:

1. Створення нового експерименту (гіпотези). Ініціація експерименту полягає у визначенні основної мети дослідження та ключових параметрів для перевірки.
2. Вибір збою з бібліотеки по методології «Інженерія хаосу». З бібліотеки можливих збоїв обирається той, який найбільше відповідає цілям експерименту. Це можуть бути збої в комунікації, перевантаження системи тощо.
3. Налаштування параметрів збою. На цьому етапі задаються ключові характеристики збою, такі як тривалість, серйозність і інші властивості. Це дозволяє точно змоделювати умови, наближені до реальних.
4. Додавання інших збоїв до того самого об'єкта. Для підвищення точності експерименту можна додати кілька збоїв для аналізу їхнього впливу на одну цільову систему або процес.
5. Додавання перевірки стійкості системи. Перевірка стійкості дозволяє оцінити, чи здатна система повернутися до стабільного стану після інциденту. Це критичний етап для виявлення потенційних слабких місць.
6. Додавання нових збоїв до експерименту. Після виконання первинних етапів можна поступово включати інші сценарії збоїв, щоб дослідити комплексні сценарії їхнього впливу.
7. Завершення експерименту. Після завершення всіх етапів аналізуються отримані дані, робляться висновки щодо виявлених вразливостей і ефективності методів усунення наслідків збоїв.

Ця методологія дозволяє забезпечити системний підхід до оцінки стійкості розподілених систем, використовуючи принципи «Інженерії хаосу», та оптимізувати роботу проектних процесів у розподілених командах.

Метою цього дослідження є інтеграція принципів методології «Інженерія хаосу» із сучасними методами управління проектами для забезпечення стійкості розподілених команд у сфері інформаційних систем та технологій. Особлива увага виділена аналізу ризиків, пов'язаних із соціокультурними бар'єрами, технічними обмеженнями, часовою, географічною та функціональною розподіленістю, а також складністю взаємодії у рамках комунікаційних платформ. Методологія «Інженерія хаосу» використовується для моделювання сценаріїв, які дозволяють оцінити ефективність інформаційних систем і технологій у критичних умовах, а також оптимізувати проектні процеси, що проходять у розподіленій команді. Завдяки цьому підходу стає можливо не лише ідентифікувати вузькі місця в роботі команди, але й розробити стратегії для мінімізації ризиків, пов'язаних із затримками в комунікації, невідповідністю інструментів, некоректним розподілом ролей та іншими критичними аспектами. Моделювання потенційних збоїв у процесах дозволяє тестувати стійкість командних взаємодій, виявляти слабкі місця в управлінні проектами та створювати підхід до їхньої оптимізації, що сприяє досягненню високої продуктивності навіть у складних умовах розподіленої роботи.

Дослідження зосереджене на розробці моделей управління ризиками, які враховують особливості роботи розподілених команд, та впровадженні практичних підходів до оптимізації проектних процесів. В статті запропоновано теоретичні основи та практичні рекомендації, що можуть стати основою для майбутніх досліджень і вдосконаленні практик управління розподіленими командами в галузі ІТ.

Аналіз досліджень. Методологія «Інженерія хаосу» зародилася як відповідь на зростаючу складність розподілених систем, зокрема в контексті хмарних обчислень. Цей підхід, вперше застосований у компанії Netflix у 2010 році, передбачає створення контрольованих експериментів для виявлення слабких місць у системах до виникнення реальних збоїв. Застосування інструменту Chaos Monkey дозволило Netflix суттєво підвищити надійність своїх послуг у динамічному середовищі. Основна ідея полягала у створенні сценаріїв, які моделюють реальні відмови, щоб протестувати стійкість систем і водночас підготувати команди до вирішення потенційних проблем.

Методологія «Інженерія хаосу» є концептуально значущим підходом для аналізу та покращення стійкості складних систем, особливо у контексті сучасних розподілених ІТ-команд. Як зазначають Віллард та Гатсон, цей підхід базується на моделюванні контрольованих збоїв у реальних середовищах з метою виявлення слабких місць до того, як вони призведуть до критичних проблем. Основна ідея полягає у створенні сценаріїв, які дозволяють перевірити, як система реагує на відмови та чи здатна вона відновлюватися без зовнішнього втручання [18].

Однією з ключових переваг методології «Інженерія хаосу» є можливість виявлення прихованих вразливостей. Наприклад, за даними Польшоньєрі, інтеграція цифрових двійників (Chaostwin) у експерименти з методологією «Інженерія хаосу» дозволяє тестувати стійкість систем

у віртуальних середовищах, що мінімізує ризики для реальних інфраструктур [19]. Це відкриває нові можливості для аналізу надійності ІТ-процесів, включно із соціальною та технічною взаємодією розподілених команд.

Інструменти у методології «Інженерія хаосу», такі як Chaos Monkey, не лише імітують можливі збої, але й дають змогу створювати складні сценарії відмов. Наприклад, використання підходу «Fail-Fast, Fail-Small» дозволяє ізолювати точки відмови та поступово знижувати функціональність, зберігаючи критично важливі сервіси [18]. У контексті розподілених систем цей підхід підтримує адаптивність, необхідну для мінімізації впливу збоїв.

У кіберфізичних системах (Cyber Physical System - CPS) методологія «Інженерія хаосу» застосовується для оцінки стійкості до таких загроз, як природні катастрофи, техногенні аварії, кібератаки, мережеві збої, а також помилки користувачів. За словами Костандіну, такі експерименти дозволяють оптимізувати взаємодію між апаратними та програмними компонентами, забезпечуючи працездатність критичних функцій навіть у складних умовах [20]. Дана особливість може бути адаптована для ІТ-команд, які працюють у багатозадачних і розподілених середовищах.

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у методологію «Інженерія хаосу» також розширює можливості цієї методології. Наприклад, Чжу, Хау та ін. стверджують, що алгоритми машинного навчання можуть прогнозувати потенційні збої, аналізуючи великі набори даних у режимі реального часу. Це дозволяє організаціям переходити від реактивного до проактивного управління ризиками, тим самим підвищуючи загальну стійкість систем [21].

Ще однією перспективою методології «Інженерія хаосу» є її використання для оптимізації гібридних хмарних середовищ. Як зазначає Діаманті, поєднання методології «Інженерія хаосу» із штучним інтелектом дозволяє автоматизувати процеси управління ресурсами, забезпечуючи їх динамічний розподіл залежно від поточних умов. Це допомагає уникати перевантажень систем і гарантує стабільність навіть під час пікових навантажень [22].

Методологія «Інженерія хаосу» демонструє значний потенціал для адаптації та оптимізації процесів в ІТ-командах. Її інтеграція з інструментами ШІ, цифровими двійниками та гібридними хмарними платформами дозволяє забезпечувати стійкість та адаптивність сучасних розподілених систем. Завдяки цьому підходу команди отримують ефективні засоби для виявлення ризиків і розробки стратегій їхнього усунення, що підвищує продуктивність та стабільність проектних процесів.

Методологія «Інженерія хаосу» базується на формуванні гіпотез про очікувану поведінку системи у стабільному стані, моделюванні реальних сценаріїв збоїв і детальному аналізі впливу таких сценаріїв на ключові показники ефективності. Особлива увага виділяється проведенню експериментів у продуктивних середовищах, що дає змогу тестувати не лише технічну, а й організаційну стійкість. Це забезпечує можливість адаптувати методологію до умов, у яких працюють сучасні розподілені команди.

Розподілені ІТ-команди стали невід'ємною частиною сучасних проектів, але їхня структура породжує низку викликів. Географічна розподіленість, яка дозволяє залучати фахівців із різних регіонів, ускладнює синхронізацію через різницю в часових поясах. Це створює бар'єри для оперативного прийняття рішень та ефективної координації. Водночас функціональна розподіленість, коли кожен учасник має чітко визначені ролі, дозволяє виконувати завдання паралельно, але водночас створює ризики розривів у комунікації між різними функціональними групами. Така структура потребує особливого підходу до управління, який враховує ці особливості.

Методологія «Інженерія хаосу» дозволяє моделювати сценарії, що враховують географічну, часову та функціональну розподіленість команд, і аналізувати, як ці фактори впливають на ефективність проектних процесів. Наприклад, імітація затримок у комунікації або збоїв у координації між функціональними групами дає змогу визначити слабкі місця у взаємодії команди й підготувати рекомендації щодо їх усунення.

Розглянемо детальніше поняття ризиків та їх класифікації. Міжнародна організація зі стандартизації [23], визначає ризик, як «вплив невизначеності на досягнення цілей». У свою чергу, Інститут управління проектами [6] визначає його як «невизначену подію або стан, які, у разі настання, можуть мати позитивний або негативний вплив на одну чи кілька цілей проекту». Згідно підходу Хілсона [24], ризик це як «невизначеність, що має значення». Це визначення акцентує увагу на тому, що ризиком вважаються лише ті невизначеності, які безпосередньо впливають на цілі проекту. Дослідники Елмс та Франк [25, 26] пропонують класифікацію невизначеностей на два основні типи: алеаторні, які характеризуються варіативністю і широким діапазоном можливих

значень, та епістемічні, що виникають через неоднозначність або брак знань. Хілсон [24] деталізує ці категорії, виокремлюючи чотири види невизначеностей: алеаторні, що пов'язані з надійністю процесів; стохастичні, які є потенційними подіями ризику; епістемічні, що зумовлені браком інформації; і онтологічні, які є невідомими («чорні лебеді»).

Варто зазначити, що онтологічна невизначеність залишається поза можливістю моделювання через повну відсутність інформації про ризик. Натомість інші види невизначеності інтегруються у модель проекту, де ймовірність та вплив кожного типу моделюються у вигляді функцій розподілу. Це дозволяє їх врахувати під час проведення симуляцій методом Монте-Карло. Симуляція на основі методу Монте-Карло, замінює матрицю ймовірність-вплив. Методологія забезпечує кількісну оцінку ризиків, дозволяючи визначити їхній вплив на тривалість та вартість проекту [27].

Управління ризиками передбачає ідентифікацію можливостей і загроз, здатних вплинути на цілі проекту, а також розробку відповідних заходів реагування. Головна мета цього процесу полягає у збільшенні шансів реалізації можливостей та зменшенні ймовірності прояву визначених загроз.

Управління ризиками в розподілених командах вимагає адаптивних стратегій. Одним із ключових підходів є використання гнучких методологій, таких як Scrum чи Kanban. Ці методології забезпечують регулярну комунікацію, короткі цикли зворотного зв'язку та можливість швидкої адаптації до змін. Водночас моделювання ризиків у контексті методології «Інженерія хаосу» дозволяє не лише тестувати технічну стійкість, а й аналізувати вплив організаційних факторів, таких як взаємодія між учасниками, ефективність використання комунікаційних інструментів і адаптація до змін.

Сучасні інформаційні системи та комунікаційні платформи відіграють ключову роль у забезпеченні функціонування розподілених команд. Інструменти управління проектами, такі як Jira чи Trello, сприяють координації завдань і забезпечують прозорість процесів, тоді як платформи для комунікації, як-от Slack чи Microsoft Teams, підтримують ефективний обмін інформацією. Проте використання цих інструментів не позбавлене викликів. Затримки в мережевих з'єднаннях, перевантаження серверів або проблеми з інтеграцією різних систем можуть впливати на ефективність роботи. Методологія «Інженерія хаосу» забезпечує можливість моделювати ці сценарії, тестувати стійкість платформ і розробляти заходи для усунення виявлених недоліків.

Отже, комплексний аналіз літератури підтверджує значний потенціал методології «Інженерія хаосу» як інструменту для підвищення стійкості розподілених ІТ-команд. Інтеграція цього підходу з сучасними методами управління ризиками та оптимізації проектних процесів відкриває нові можливості для ефективної роботи команд у сучасному динамічному середовищі.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Методологія «Інженерія хаосу» створює можливість моделювання збоїв у реальних умовах для вивчення реакції системи та команд, що забезпечує глибоке розуміння слабких місць. У розподілених ІТ-командах, де процеси є багатшаровими і залежними від комунікаційних та інформаційних систем, застосування цього підходу може виявити потенційні ризики та сприяти підвищенню стійкості. З огляду на складність таких систем, запропонуємо розширений набір гіпотез.

Таблиця 1
Гіпотези для дослідження стійкості розподілених ІТ-команд з використанням принципів методології «Інженерія хаосу»

Категорія гіпотез	Формулювання гіпотез
Стійкість розподілених команд	Впровадження принципів методології «Інженерія хаосу» дозволяє виявити вузькі місця у функціональній, часовій та комунікаційній складових розподіленої команди.
	Розподіл ролей у команді за функціональною ознакою підвищує ефективність виконання завдань та мінімізує втрати через дублювання функцій.
	Використання локальних проксі-ролей, таких як локальний Власник продукту (Product Owner), знижує час на прийняття рішень в умовах географічної розподіленості.
	Динамічна адаптація до змін у проектах, включаючи зміну чи оновлення складу команди, дозволяє зменшити ризики затримок.

	Інтеграція принципів методології «Інженерія хаосу» із Scrum допомагає оптимізувати короткострокові завдання та підвищити продуктивність команди.
	Рівень змінності команди та її вплив на проєктні ризики вимагає врахування додаткових сценаріїв, зокрема кадрових ротацій та їх наслідків.
	Функціональна розподіленість команд напряму впливає на розподіл завдань і зниження ризиків дублювання функцій.
Комунікаційні бар'єри	Збільшення часових зон між учасниками команди пропорційно підвищує ризик затримок у виконанні завдань.
	Використання автоматизованих комунікаційних інструментів (Slack, Microsoft Teams) зменшує вплив мовних та часових бар'єрів.
	Імітація збоїв у комунікаційних технологіях допомагає визначити критичні залежності між командами.
	Планування синхронних зустрічей у спільних часових слотах знижує ризики неправильного розуміння завдань.
	Скорочення кількості комунікаційних вузлів між учасниками команди зменшує ризик втрати важливої інформації.
Ефективність інформаційних систем	Стійкість проєкту залежить від інтеграції інформаційних систем, які використовуються у розподіленій команді, із загальними платформами управління проєктами.
	Впровадження методології «Інженерія хаосу» дозволяє оцінити реакцію інформаційних систем на раптові збої та їх вплив на проєктні процеси.
	Частота технічних збоїв у системах управління завданнями пропорційна втратам у продуктивності команди.
	Автоматизація звітності у системах управління проєктами мінімізує ризики, пов'язані з людським фактором.
	Імітація надмірного навантаження на інформаційні системи дозволяє оцінити їхню продуктивність у критичних умовах.
Управління змінами в командах	Планування та управління виходами учасників команди (через відпустки, хвороби, звільнення) знижує ризик затримок у виконанні завдань.
	Імітація сценаріїв несподіваного виходу ключового учасника проєкту дозволяє оцінити стійкість команди до кадрових змін.
	Оптимізація навантаження учасників команди сприяє стабільності проєкту у довгостроковій перспективі.
Функціональний розподіл та ризики	Чітке визначення зон відповідальності у команді мінімізує ризики конфліктів та дублювання роботи.
	Імітація затримок виконання функціонально залежних завдань дозволяє ідентифікувати критичні вузли проєктного процесу.

Кожна з запропонованих гіпотез дозволяє оцінити окремий аспект роботи розподілених команд та виявити ключові ризики, пов'язані із взаємодією учасників, комунікаційними технологіями, інформаційними системами та проєктними процесами.

У розподілених ІТ-командах управління ризиками є ключовим завданням для забезпечення стабільності та продуктивності проєктних процесів. Зважаючи на географічну, функціональну та часову розподіленість, а також використання різних інформаційних систем і комунікаційних технологій, виникає потреба у кількісному аналізі впливу цих факторів. Для цього розроблено систему параметрів, яка дозволяє оцінити ризики та ефективність їхнього управління.

Описані параметри враховують ключові аспекти функціонування розподілених команд, включаючи комунікаційні та інформаційні бар'єри, час реагування на завдання, стабільність системи, ефективність використання проксі-ролей і рівень виконання завдань. Наведені формули забезпечують основу для математичного аналізу цих параметрів, що дозволяє систематизувати підхід до управління ризиками в динамічних умовах.

Далі наведено опис кожного параметра, його тлумачення та математичну інтерпретацію.

Часова затримка (TL_t) є одним із ключових параметрів, що відображає ефективність комунікації між учасниками розподіленої команди. Вона визначається часом, необхідним для отримання відповіді на запит, і залежить від часових зон, швидкості реакції та доступності учасників.

$$TL_t = \frac{\sum_{i=1}^n t_{response,i} - t_{request,i}}{n}$$

де $t_{response,i}$ — час отримання відповіді на i -й запит, $t_{request,i}$ — час відправлення запиту, n — кількість запитів.

Комунікаційні бар'єри (CB_t) включають соціокультурні, мовні та технічні перешкоди, які можуть впливати на взаєморозуміння між членами команди. Вони є важливим фактором ризику, оскільки спричиняють затримки або нерозв'язаність завдань.

$$CB_t = \frac{N_{unresolved}}{N_{total}}$$

де $N_{unresolved}$ — кількість завдань, що залишилися нерозв'язаними через комунікаційні труднощі, N_{total} — загальна кількість завдань у вибірці.

Інформаційні бар'єри (IB_t) виникають через несумісність інформаційних систем або їхню низьку продуктивність, що призводить до затримок у виконанні запитів.

$$IB_t = \frac{\sum_{i=1}^m t_{execution,i}}{m}$$

де $t_{execution,i}$ — час виконання i -го запиту в інформаційній системі, m — кількість запитів.

Стабільність системи (S_t) є ключовим показником, що відображає частоту збоїв у роботі інформаційних систем і вплив цих збоїв на виконання завдань. Вона оцінює ймовірність успішного завершення завдань без порушень.

$$S_t = \frac{N_{failures}}{N_{total}}$$

де $N_{failures}$ — кількість збоїв за визначений період, N_{total} — загальна кількість завдань.

Ефективність проксі-ролей (PR_t) оцінює здатність локальних представників, таких як проксі-Власник продукту (Product Owner) вирішувати завдання без залучення головного Власника продукту (Product Owner). Це дозволяє мінімізувати затримки у прийнятті рішень.

$$PR_t = \frac{N_{proxy_resolved}}{N_{total_tasks}}$$

де $N_{proxy_resolved}$ — кількість завдань, вирішених проксі-ролями, N_{total_tasks} — загальна кількість завдань.

Цей показник (C_t) є індикативним параметром, що дозволяє кількісно оцінити рівень досягнення командою поставлених цілей протягом визначеного періоду часу.

Це співвідношення завершених завдань до запланованих.

$$C_t = \frac{N_{completed}}{N_{planned}}$$

де $N_{completed}$ — кількість завершених завдань, $N_{planned}$ — кількість запланованих завдань. Цей параметр виконує допоміжну функцію в системі управління ризиками, оскільки його значення опосередковано формується на основі таких ключових показників моделі, як стабільність системи (S_t), часова затримка (TL_t) та ефективність проксі-ролей (PR_t). Таким чином, (C_t) використовується для загальної оцінки продуктивності команди, проте не є безпосередньо інтегрованим у математичну модель, зважаючи на його вторинний характер і залежність від інших базових параметрів.

Рівень змінності команди (HR_t) — параметр оцінює частоту виходу учасників із проекту через відпустки, хвороби чи інші причини, що впливає на стабільність проекту.

$$HR_t = \frac{N_{exits}}{T}$$

де N_{exits} — кількість виходів учасників за період, T — тривалість періоду (у днях).

Функціональна розподіленість (FD_t) параметр характеризує взаємодоповнюваність функціональних ролей у команді, що впливає на ефективність розподілу завдань.

$$FD_t = \frac{\sum_{i=1}^k R_{efficiency,i}}{k}$$

де $R_{efficiency,i}$ — ефективність виконання завдань i -ї ролі, k — кількість функціональних ролей у команді.

Перераховані вище параметри формують основу для кількісної оцінки ефективності управління ризиками в розподілених командах. Їх використання дозволяє моделювати та прогнозувати вплив ризиків, пов'язаних із комунікацією, інформаційними системами та організаційними змінами.

Розподілені IT-команди функціонують у динамічному середовищі, що постійно піддається впливу внутрішніх і зовнішніх змін. Ефективне управління ризиками в таких командах вимагає врахування динамічних факторів, таких як часові, функціональні, комунікаційні бар'єри, зміни в складі команди, а також вплив технічних збоїв. У цьому контексті використання принципів методології «Інженерія хаосу» стає ключовим елементом для моделювання сценаріїв, які допомагають ідентифікувати та мінімізувати ризики у супроводі проєктних процесів.

Робота розподілених команд в умовах динамічного середовища потребує інтеграції методів методології «Інженерія хаосу» із математичними моделями для оцінки ризиків. Основним завданням є врахування змінних параметрів системи у дискретні моменти часу, що дозволяє точніше відобразити динаміку процесів. Застосування дискретних часових індексів t_j дає змогу точно відображати стан системи на визначених етапах її функціонування, що забезпечує детальний аналіз динаміки змін та оцінку ефективності управління ризиками в межах кожного окремого інтервалу часу. Модель для оцінки ефективності управління ризиками в розподілених IT-командах із інтеграцією принципів методології «Інженерія хаосу» має наступний вигляд (фор. 1). Вона забезпечує аналіз параметрів системи у дискретних часових моментах t_j , враховуючи динамічний характер процесів у команді та реакцію на збої, моделюванні у межах методології «Інженерія хаосу».

Загальний рівень ефективності управління ризиками R_t розраховується як середньозважене значення параметрів у дискретні моменти часу:

$$R(t) = \frac{\sum_{j=1}^n (\omega_{TL} \cdot TL(t_j) + \omega_{CB} \cdot CB(t_j) + \omega_{IB} \cdot IB(t_j) + \omega_S \cdot S(t_j) + \omega_{PR} \cdot PR(t_j) + \omega_{HR} \cdot HR(t_j) + \omega_{FD} \cdot FD(t_j)) \cdot \Delta t_j}{\sum_{j=1}^n \Delta t_j} \quad (1)$$

де:

- t_j – часові індекси, які позначають стан системи в момент часу j ;
- $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ – тривалість інтервалу між двома послідовними моментами часу;
- ω_{TL} – ваговий коефіцієнт комунікаційної ефективності, що відображає значення параметрів часу затримки (TL) у загальній моделі (коефіцієнт затримки відповіді);
- ω_{CB} – ваговий коефіцієнт комунікаційних бар'єрів, що враховує, наскільки критичними є комунікаційні бар'єри (CB) для роботи команди (коефіцієнт комунікаційних бар'єрів);
- ω_{IB} – ваговий коефіцієнт інформаційної ефективності, що відображає вплив інформаційних бар'єрів (IB) на продуктивність (коефіцієнт стабільності інформаційних систем);
- ω_S – ваговий коефіцієнт стійкості системи, що показує значення стабільності (S) для загальної оцінки (коефіцієнт стійкості системи);
- ω_{PR} – ваговий коефіцієнт ефективності проксі-ролей, що враховує вплив проксі-ролей (PR) на управління ризиками (коефіцієнт проксі-ефективності);
- ω_{HR} – ваговий коефіцієнт рівня змінності команди, що враховує частоту виходів учасників із проєкту (HR) та їх вплив на стабільність процесів (коефіцієнт змінності);
- ω_{FD} – ваговий коефіцієнт функціональної розподіленості, що оцінює узгодженість функціональних ролей у команді (FD) та вплив цього показника на ефективність виконання завдань (коефіцієнт функціональної розподіленості);
- C_t – показник виконання завдань, який є додатковим індикатором продуктивності команди.

Значення вагових коефіцієнтів мають бути встановлені залежно від особливостей конкретного проєкту, його вимог та ризиків.

Основні методи визначення.

Експертна оцінка. У цьому підході залучаються експерти з управління проєктами, які на основі свого досвіду визначають пріоритетність параметрів. Значення коефіцієнтів залежать від контексту проєкту.

Наприклад:

- для проєктів із високою залежністю від комунікацій: $\omega_{TL} = 0.4$, $\omega_{CB} = 0.3$.
- для проєктів із складною ІТ-інфраструктурою: $\omega_{IB} = 0.5$, $\omega_S = 0.3$.

Аналіз історичних даних. Цей підхід базується на аналізі попередніх проєктів для визначення значущості параметрів. Якщо історичні дані показують, що комунікаційні бар'єри є частою причиною затримок, коефіцієнт ω_{CB} збільшується. Аналогічно, якщо стабільність інформаційних систем відіграє ключову роль у проєктах, підвищується ω_{IB} . В проєктах із високою змінністю учасників значення ω_{HR} отримує пріоритет. Додатково, у проєктах із низьким рівнем завершення завдань (C_t) можуть підвищуватися вагові коефіцієнти ω_S або ω_{FD} .

Метод аналізу ієрархій. Метод передбачає побудову матриці парного порівняння параметрів за важливістю. На основі цих порівнянь розраховується нормалізована шкала ваг. Наприклад:

- Якщо затримка відповіді (TL) важливіша за інформаційні бар'єри (IB), то коефіцієнт $\omega_{TL} > \omega_{IB}$. Результати матриці дозволяють отримати обґрунтовані вагові коефіцієнти.
- Якщо функціональна розподіленість (FD) є критичною для виконання завдань, ω_{FD} має вищий пріоритет, ніж інші коефіцієнти.

Динамічний підхід. У цьому підході ваги змінюються залежно від стадії проєкту та актуальних ризиків.

Наприклад:

- на початкових етапах проєкту значення ω_{PR} (ефективність проксі-ролей) може бути низьким, але зростає в міру збільшення залежності від локальних ролей;
- у проєктах із високою змінністю команди значення ω_{HR} зростає на завершальних етапах для врахування ризиків кадрових змін;
- у проєктах із швидкими змінами значущість стабільності систем ω_S зростає у критичних фазах.
- у проєктах із низькими показниками завершення завдань (C_t) можуть переглядатися вагові коефіцієнти для стабільності (ω_S) та комунікаційної ефективності (ω_{TL}).

Для полегшення вибору значень вагових коефіцієнтів, пропонується орієнтовна таблиця 2.

Таблиця 2
Рекомендовані значення вагових коефіцієнтів для моделі оцінки ефективності

Коефіцієнт	Оптимальне значення	Ризикове значення	Критичне значення
ω_{TL} – коефіцієнт затримки відповіді	0.2	0.4	0.6
ω_{CB} – коефіцієнт комунікаційних бар'єрів	0.3	0.5	0.7
ω_{IB} – коефіцієнт стабільності інформаційних систем	0.4	0.6	0.8
ω_S – коефіцієнт стійкості системи	0.3	0.5	0.7
ω_{PR} – коефіцієнт проксі-ефективності	0.3	0.4	0.6
ω_{HR} – коефіцієнт змінності команди	0.2	0.3	0.5
ω_{FD} – коефіцієнт функціональної розподіленості	0.2	0.3	0.5

Методологія «Інженерія хаосу» створює умови для динамічної адаптації вагових коефіцієнтів моделі управління ризиками шляхом аналізу чутливості ключових параметрів до змодельованих збоїв. У дискретний момент часу t_j моделюється комунікаційний збій, після чого виконуються кількісні оцінки параметрів $TL(t_j)$, $CB(t_j)$, $IB(t_j)$ та інших параметрів моделі, таких як $HR(t_j)$, $FD(t_j)$, до і після інциденту. Результати такого аналізу слугують основою для корекції вагових

коефіцієнтів залежно від їх впливу на загальну стійкість системи. Наприклад, якщо результати експерименту демонструють, що стабільність системи S є домінуючим фактором, ваговий коефіцієнт ω_S збільшується. Водночас, якщо ефективність комунікації критично залежить від часових затримок, ваговий коефіцієнт ω_{TL} підвищується пропорційно їх впливу. Таким чином, вагові коефіцієнти не лише відображають специфіку конкретного проекту, а й забезпечують можливість гнучкої адаптації моделі до реальних умов, підвищуючи ефективність і релевантність управління ризиками в умовах розподілених ІТ-систем.

Запропонована модель дозволяє оцінювати ефективність управління ризиками в розподілених ІТ-командах на основі параметрів, що відображають різні аспекти роботи системи. Ключовими компонентами є часова затримка ($TL(t_j)$), комунікаційні бар'єри ($CB(t_j)$), інформаційні бар'єри ($IB(t_j)$), стабільність системи ($S(t_j)$), рівень змінності команди ($HR(t_j)$), функціональна розподіленість ($FD(t_j)$) та ефективність проксі-ролей ($PR(t_j)$), що оцінюються у дискретні моменти часу (t_j).

Часова затримка ($TL(t_j)$). Параметр оцінює ефективність комунікації між членами команди, визначаючи середній час відгуку на запити:

$$TL(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{response,i} - t_{request,i}),$$

де $t_{response,i}$ — час відповіді на i -й запит, $t_{request,i}$ — час надсилання запиту, n — кількість запитів у часовому інтервалі.

Комунікаційні бар'єри ($CB(t_j)$). Цей параметр враховує вплив мовних, культурних або технологічних бар'єрів на ефективність виконання завдань:

$$CB(t_j) = \frac{N_{unresolved}}{N_{total}},$$

де $N_{unresolved}$ — кількість завдань, які залишилися невирішеними через бар'єри, а N_{total} — загальна кількість завдань.

Інформаційні бар'єри ($IB(t_j)$). Параметр оцінює затримки або несумісність інформаційних систем:

$$IB(t_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{execution,i},$$

де $t_{execution,i}$ — час виконання i -го запиту, m — кількість запитів у вибраному інтервалі.

Стабільність системи ($S(t_j)$). Цей показник відображає частку успішно завершених завдань:

$$S(t_j) = \frac{N_{success}}{N_{total}},$$

де $N_{success}$ — кількість успішно завершених завдань, N_{total} — загальна кількість завдань.

Ефективність проксі-ролей ($PR(t_j)$). Цей параметр характеризує здатність локальних ролей, наприклад проксі-Власник продукту (Product Owner), вирішувати завдання без участі основних виконавців:

$$PR(t_j) = \frac{N_{proxy_resolved}}{N_{total_tasks}},$$

де $N_{proxy_resolved}$ — кількість завдань, вирішених проксі-ролями, N_{total_tasks} — загальна кількість завдань.

Для забезпечення систематичного підходу до оцінки ефективності управління ризиками в розподілених ІТ-командах було розроблено схему алгоритму, яка ілюструє ключові етапи аналізу та прийняття рішень при використанні моделі згідно методології «Інженерія хаосу». Схема алгоритму є інструментом для візуалізації аналізу параметрів, їх перевірки та розробки оптимізаційних стратегій (рис. 2).

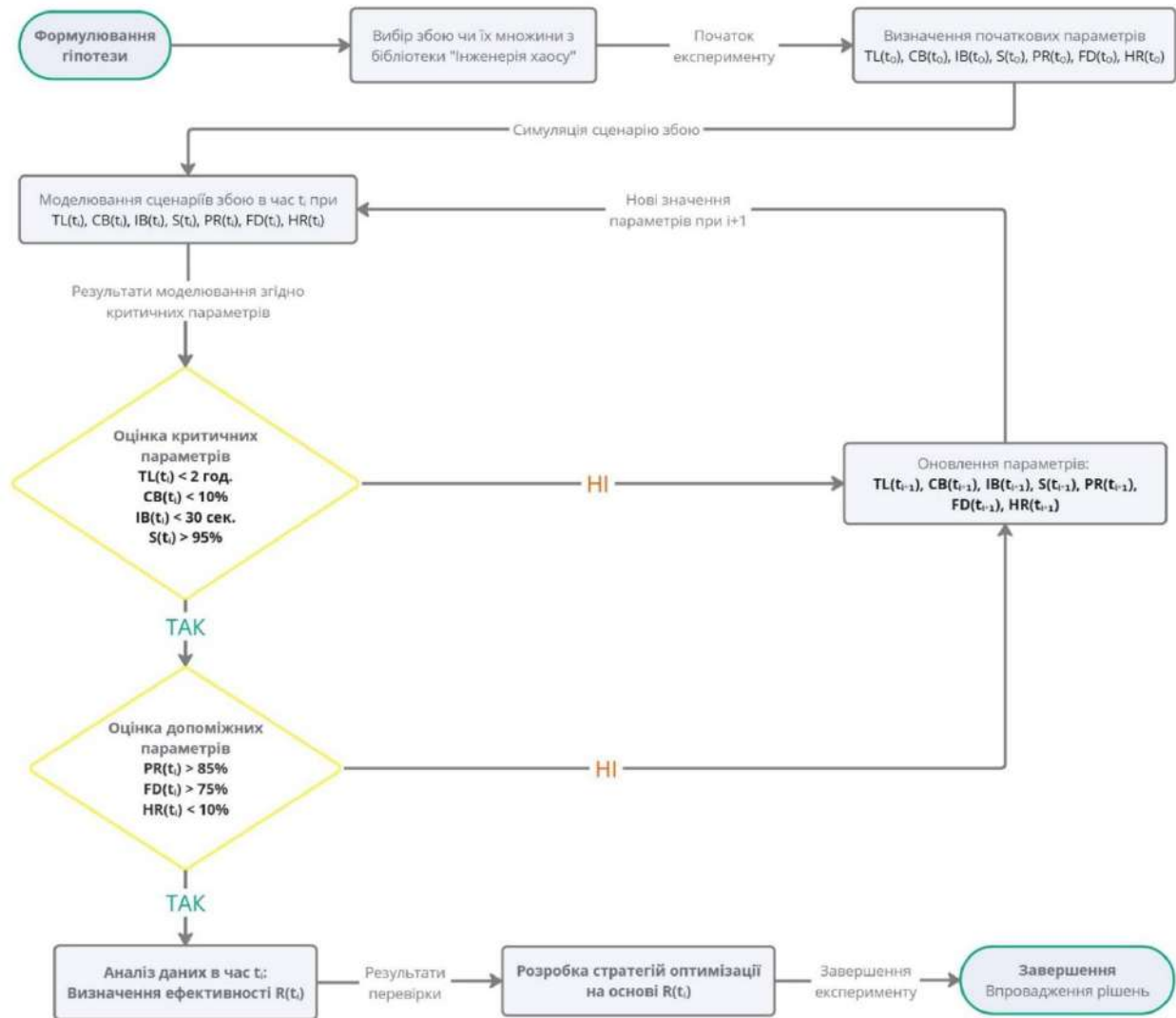


Рис. 2 – Алгоритм оцінки та оптимізації ефективності управління ризиками в розподілених ІТ-командах

Подана схема алгоритму (рис. 2) відображає етапи моделювання та перевірки параметрів у рамках методології управління ризиками розподілених ІТ-команд. Алгоритм базується на поетапній оцінці ключових параметрів моделі, з подальшим оновленням їх значень у відповідності до отриманих результатів моделювання.

На першому етапі здійснюється оцінка критичних параметрів — часу затримки (TL), комунікаційних бар'єрів (CB), інформаційних бар'єрів (IB) і стабільності системи (S). Ці параметри є фундаментальними для оцінки загального стану системи, оскільки їх відхилення можуть суттєво впливати на ефективність командної роботи. Критерії оцінки визначені на основі порогових значень, представлених у таблиці 3.

Таблиця 3
 Критерії оцінки критичних параметрів моделі

Параметр	Оптимальне значення	Допустиме значення	Критичне значення
$TL(t)$	< 2 год.	2–4 год.	> 4 год.
$CB(t)$	< 10%	10–20%	> 20%
$IB(t)$	< 30 сек.	30–60 сек.	> 60 сек.
$S(t)$	> 95%	80–95%	< 80%

У разі, якщо значення критичних параметрів виходять за межі допустимих рівнів, здійснюється корекція моделі із внесенням змін до параметрів і повторною перевіркою.

На другому етапі оцінюються допоміжні параметри, зокрема ефективність проксі-ролей (PR), функціональна розподіленість (FD) і рівень змінності команди (HR). Ці параметри є важливими для

деталізації оцінки та вдосконалення моделі, оскільки вони відображають гнучкість і стійкість командних процесів. Їх порогові значення наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Критерії оцінки допоміжних параметрів моделі

Параметр	Оптимальне значення	Допустиме значення	Критичне значення
$PR(t)$	$> 85\%$	70–85%	$< 70\%$
$FD(t)$	$> 75\%$	50–75%	$< 50\%$
$HR(t)$	$< 10\%$	10–20%	$> 20\%$

Результати аналізу параметрів використовуються для розробки оптимізаційних стратегій, що враховують виявлені ризики та потенційні покращення. Інтеграція моделі з принципами методології «Інженерія хаосу» дозволяє підвищити її адаптивність до динамічних умов роботи розподілених команд.

Вибір вагових коефіцієнтів у моделі оцінки ефективності управління ризиками в розподілених ІТ-командах залежить від специфіки проекту, пріоритетності ризиків і еталонних значень параметрів. Розглянемо основні аспекти формування вагових коефіцієнтів.

Пріоритетність вагових коефіцієнтів формується відповідно до критичних аспектів проекту.

До прикладу у проектах із високою залежністю від синхронної комунікації між командами ваговий коефіцієнт ω_{CB} може отримати найвищий пріоритет. Це пов'язано з необхідністю оперативного вирішення задач, де комунікаційні бар'єри є ключовим фактором ризику. Проте у технічно складних проектах, де критичною є стабільність інформаційних систем, домінуючим стає коефіцієнт ω_{IB} , що відображає вплив інформаційних бар'єрів на продуктивність. Для проектів із частими змінами складу команди або складною функціональною структурою, пріоритет можуть отримати коефіцієнти ω_{HR} та ω_{FD} , які відображають змінність команди та її функціональну узгодженість.

Еталонні значення допомагають встановити допустимі та критичні межі для кожного параметра.

Для параметра часова затримка $TL(t_j)$:

- **Оптимальний рівень:** $TL(t_j) < 5$ хвилин. Такий показник досяжний для задач, які виконуються в синхронному режимі або в межах близьких часових поясів.
- **Допустимий рівень:** $5 \text{ хвилин} \leq TL(t_j) \leq 2$ години. Цей рівень враховує взаємодію між учасниками, які працюють у різних часових зонах, і допускає час на аналіз запиту.
- **Ризиковий рівень:** $TL(t_j) > 2$ години. Затримка понад цей час вказує на суттєві комунікаційні чи організаційні проблеми, які можуть впливати на продуктивність і синхронізацію команд.

Параметр $TL(t_j)$ визначає середній час між моментом надсилання запиту та отриманням відповіді. Він враховує кілька важливих аспектів, які суттєво впливають на ефективність взаємодії в розподілених командах. Першим аспектом є технічна складова, яка охоплює затримки в передачі даних через інформаційні системи або мережеву інфраструктуру. Наприклад, затримки можуть виникати через перевантаження серверів або недостатню швидкість мережевого з'єднання.

Другим ключовим аспектом є час реакції людини. Цей період включає час, необхідний учаснику команди для обробки запиту. Він залежить від поточного робочого навантаження, рівня доступності, а також складності завдання. Додатково враховується вплив контексту, у якому працює команда, зокрема можливість одночасної участі в інших процесах.

Третім аспектом є організаційні чинники. Вони включають затримки, що виникають через необхідність уточнення деталей запиту, ескалацію до відповідальної особи або перенаправлення завдання між різними учасниками команди. Такі затримки можуть бути спричинені недостатньо чіткими регламентами або складністю структури команди.

У розподілених командах, де учасники можуть перебувати в різних часових поясах і залежати від складних інформаційних систем, параметр $TL(t_j)$ забезпечує комплексну оцінку оперативності взаємодії. Він дозволяє визначити потенційні проблеми у комунікації, які можуть уповільнити прийняття рішень та знизити продуктивність проекту. Цей показник є критичним для розподілених команд, де часові пояси й мережеві залежності створюють додаткові бар'єри для оперативної взаємодії.

Для параметра комунікаційні бар'єри $CB(t_j)$:

- Допустимий рівень: до 10% завдань із бар'єрами.
- Ризиковий рівень: понад 20% завдань, що свідчить про необхідність корекції процесів.

Для стабільності системи $S(t_j)$:

- Оптимальний рівень: понад 95% успішно виконаних завдань.
- Ризиковий рівень: нижче 80%, що свідчить про значні технічні чи організаційні ризики.

Для ефективності проксі-ролей $PR(t_j)$:

- Оптимальний рівень: понад 85%, що відображає високу автономність локальних команд.
- Ризиковий рівень: нижче 70%, що може свідчити про затримки в прийнятті рішень.

Дискретна модель оцінки ефективності управління ризиками має низку важливих переваг, які підкреслюють її наукову та практичну цінність. Однією з ключових особливостей є її точність, що забезпечується можливістю аналізу впливу окремих інцидентів у визначені часових інтервалів. Це дозволяє глибше оцінити динаміку змін у системі та ідентифікувати критичні вузькі місця.

Ще однією суттєвою перевагою моделі є її гнучкість, яка проявляється у здатності адаптуватися до різних масштабів і стадій проекту. Це дозволяє враховувати специфіку не лише короткострокових завдань, але й довгострокових проєктів із високою кадровою змінністю або функціональною складністю.

Окрім того, модель вирізняється високою практичністю. Її простота в реалізації сприяє ефективному використанню в реальних умовах, особливо для аналізу великих обсягів даних. Ця властивість робить її зручною для інтеграції в існуючі системи управління ризиками, забезпечуючи високу оперативність у прийнятті рішень.

Проте, незважаючи на переваги дискретної моделі оцінки ефективності управління ризиками, існує потреба у подальшій оптимізації підходів, які могли б не лише кількісно оцінювати ризики, але й забезпечувати практичну перевірку стійкості систем у реальних умовах. У цьому контексті в майбутніх дослідженнях буде розглянуто інтегрування методів кількісного аналізу, таких як Monte Carlo Simulation (MCS), із практичними експериментами, що пропонує методологія «Інженерія хаосу».

Висновки. Запропонована в межах дослідження модель управління ризиками для розподілених ІТ-команд, інтегрована з принципами методології «Інженерія хаосу», надає можливість цілеспрямовано виявляти критичні ризики, оптимізувати проєктні процеси та підвищувати загальну стійкість команд. Її математичне підґрунтя охоплює низку ключових параметрів, специфічних для розподілених середовищ: часова затримка $TL(t)$, комунікаційні бар'єри $CB(t)$, інформаційні бар'єри $IB(t)$, стабільність системи $S(t)$, ефективність проксі-ролей $PR(t)$, функціональна розподіленість $FD(t)$ та рівень змінності команди $HR(t)$. Для інтегральної оцінки цих показників використовується загальний рівень ефективності управління ризиками $R(t)$, що зважає значущість кожного параметра та дозволяє відстежувати динаміку змін стійкості команди впродовж усього життєвого циклу проєкту.

Важливо, що модель передбачає динамічну адаптацію вагових коефіцієнтів, які визначають внесок окремих параметрів, залежно від результатів експериментів у межах методології «Інженерія хаосу» (Chaos Engineering). Це сприяє оперативному виявленню «вузьких місць» під час виконання завдань та підвищує ефективність керування проєктами. Крім того, модель не лише виявляє теоретичні загрози, а й практично перевіряє стійкість системи в продуктивному режимі: різнопланові імітації збоїв дають змогу комплексно оцінити вплив відмов як на технічні, так і на організаційні аспекти.

Незважаючи на очевидні переваги, подальші дослідження є доцільними для більш комплексного охоплення ймовірнісних сценаріїв, зокрема «каскадних» або багатофакторних збоїв. У цьому контексті інтегрування методу Monte Carlo Simulation (MCS) зі сценаріями, сформованими на засадах підходу методології «Інженерія хаосу», розглядається як перспективний напрям. Такий синергетичний підхід забезпечить імовірнісний прогноз впливу потенційних ризик-подій на тривалість і вартість проєктів, а також на динаміку робочих процесів у розподілених ІТ-командах. Як наслідок, удосконалена модель сприятиме гнучкішому коригуванню підходів до управління проєктними процесами з урахуванням специфіки розподілених команд, адже поєднує імовірнісну оцінку ризиків із практичною перевіркою стійкості у межах методології «Інженерія хаосу». Водночас, подальше розширення бібліотеки сценаріїв цієї методології дасть змогу імітувати ще ширший спектр нетипових (аномальних) подій, у тому числі зі складною каскадною природою, що

збагатить можливості кількісного аналізу ризиків та посилить готовність розподілених ІТ-команд до непередбачуваних збоїв. Така інтеграція підвищує прогнозованість і ефективність роботи розподілених проєктних команд, водночас формуючи надійне підґрунтя для продуктивної діяльності в умовах високої невизначеності сучасних ІТ-середовищ.

Список бібліографічного опису

1. Buffer (2022). State of Remote Work 2022: The Annual Buffer Report. Buffer Publishing. <https://buffer.com/state-of-remote-work/2022>
2. Gartner (2022). Future of Work Trends Post-COVID-19: Long-Term Impact & Actions for HR. *Gartner Research*. <https://www.gartner.com/en/human-resources/trends/future-of-work-trends-post-covid-19>
3. Project Management Institute (2021). Pulse of the Profession: Beyond Agility. PMI Publishing.
4. Steffen Fuchs, James Nowicke, Gernot Strube (2017). Navigating the digital future: The disruption of capital projects. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/navigating-the-digital-future-the-disruption-of-capital-projects>
5. Project Management Institute (PMI) (2021). PMI study reveals poor communication leads to project failure one-third of the time. Ascertra Blog. <https://www.ascertra.com/blog/pmi-study-reveals-poor-communication-leads-to-project-failure-one-third-of-the-time>
6. Project Management Institute (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition*.
7. De Bakker, K., Boonstra, A., Wortmann, H. (2010). Does risk management contribute to IT project success? A meta-analysis of empirical evidence. *International Journal of Project Management*, 28(5), 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.07.002>
8. Salmeron, J. L., Lopez, C. (2012). Forecasting risk impact on ERP maintenance with augmented fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 38(2), 439–452. <https://doi.org/10.1109/TSE.2011.8>
9. Neves, S. M., da Silva, C. E. S., Salomon, V. A. P., da Silva, A. F., Sotomonte, B. E. P. (2014). Risk management in software projects through knowledge management techniques: cases in Brazilian incubated technology-based firms. *International Journal of Project Management*, 32(1), 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.02.007>
10. March, J. G., Shapira, Z. (1987). Managerial perspectives on risk and risk taking. *Management Science*, 33(11), 1404–1418. <https://doi.org/10.1287/mnsc.33.11.1404>
11. Reeves, J. D., Eveleigh, T., Holzer, T. H., Sarkani, S. (2013). Risk identification biases and their impact to space system development project performance. *Engineering Management Journal*, 25(2), 3–12. <https://doi.org/10.1080/10429247.2013.11431970>
12. Jiang, J., Klein, G. (2000). Software development risks to project effectiveness. *The Journal of Systems and Software*, 52(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/S0164-1212\(99\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S0164-1212(99)00128-4)
13. Jiang, J., Klein, G., & Discenza, R. (2001). Information systems success as impacted by risks and development strategies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(1), 46–55. <https://doi.org/10.1109/17.913165>
14. Raz, T., Shenhar, A. J., Dvir, D. (2002). Risk management, project success, and technological uncertainty. *R&D Management*, 32(2), 101–109. <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00243>
15. Wallace, L., Keil, M. (2004). Software project risks and their effect on outcomes. *Communications of the ACM*, 47(4), 68–73. <https://doi.org/10.1145/975817.9758>
16. Wallace, L., Keil, M., Rai, A. (2004). Understanding software project risk: a cluster analysis. *Information Management*, 42(1), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.12.007>
17. Han, W. M., Huang, S. J. (2007). An empirical analysis of risk components and performance on software projects. *Journal of Systems and Software*, 80(1), 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.04.030>
18. Jill Willard, James Hutson (2024). Fail Fast, Fail Small: Designing Resilient Systems for the Future of Software Engineering. *International Journal of Recent Engineering Science*, 11 (5), 51–58. <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V11I5P106>
19. Filippo Poltronieri, Mauro Tortonesi, Cesare Stefanelli (2021). ChaosTwin: A Chaos Engineering and Digital Twin Approach for The Design of Resilient IT Services. *2021 17th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 234–238. <https://doi.org/10.23919/CNSM52442.2021.9615519>
20. C. Konstantinou, G. Stergiopoulos, M. Parvania, P. Esteves-Verissimo (2021). Chaos Engineering for Enhanced Resilience of Cyber-Physical Systems. *2021 Resilience Week (RWS)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/RWS52686.2021.9611797>
21. Yongqing Zhu, Kiam Cheng How, Horng Jyh Wu, Qi Cao (2023). AI-based Proactive Storage Failure Management in Software-Defined Data Centres. In *Proceedings of the 2023 6th International Conference on Information Science and Systems (ICISS '23)*, 231–237. <https://doi.org/10.1145/3625156.3625190>
22. Alessio Diamanti, José Manuel Sánchez Vilchez, Stefano Secci (2022). An AI-Empowered Framework for Cross-Layer Softwarized Infrastructure State Assessment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19 (4), 4434–4448. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3161872>
23. ISO. (2018). ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. International Organization for Standardization.
24. Hillson D (2014). How to manage the risks you didn't know you were taking. PMI® Global Congress 2014—North America, Phoenix, AZ. Newtown Square, PA: Project Management Institute.
25. Elms D.G. (2004) Structural safety: Issues and progress. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6 (2), 116–126. <https://doi.org/10.1002/pse.176>
26. Frank M. (1999) Treatment of uncertainties in space nuclear risk assessment with examples from Cassini mission implications. *Reliability Engineering & System Safety*, 66 (3), 203–221. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(99)00002-2)

27. Randy Heffernan (2021). Monte Carlo Simulation Provides Insights to Manage Risks. Risk Management Magazine. <https://www.rmmagazine.com/articles/article//2021/05/28/monte-carlo-simulation-provides-insights-to-manage-risks>

References

1. Buffer (2022). State of Remote Work 2022: The Annual Buffer Report. Buffer Publishing. <https://buffer.com/state-of-remote-work/2022>
2. Gartner (2022). Future of Work Trends Post-COVID-19: Long-Term Impact & Actions for HR. Gartner Research. <https://www.gartner.com/en/human-resources/trends/future-of-work-trends-post-covid-19>
3. Project Management Institute (2021). Pulse of the Profession: Beyond Agility. PMI Publishing.
4. Steffen Fuchs, James Nowicke, Gernot Strube (2017). Navigating the digital future: The disruption of capital projects. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/navigating-the-digital-future-the-disruption-of-capital-projects>
5. Project Management Institute (PMI) (2021). PMI study reveals poor communication leads to project failure one-third of the time. Ascertra Blog. <https://www.ascertra.com/blog/pmi-study-reveals-poor-communication-leads-to-project-failure-one-third-of-the-time>
6. Project Management Institute (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Seventh Edition*.
7. De Bakker, K., Boonstra, A., Wortmann, H. (2010). Does risk management contribute to IT project success? A meta-analysis of empirical evidence. *International Journal of Project Management*, 28(5), 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.07.002>
8. Salmeron, J. L., Lopez, C. (2012). Forecasting risk impact on ERP maintenance with augmented fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 38(2), 439–452. <https://doi.org/10.1109/TSE.2011.8>
9. Neves, S. M., da Silva, C. E. S., Salomon, V. A. P., da Silva, A. F., Sotomonte, B. E. P. (2014). Risk management in software projects through knowledge management techniques: cases in Brazilian incubated technology-based firms. *International Journal of Project Management*, 32(1), 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2013.02.007>
10. March, J. G., Shapira, Z. (1987). Managerial perspectives on risk and risk taking. *Management Science*, 33(11), 1404–1418. <https://doi.org/10.1287/mnsc.33.11.1404>
11. Reeves, J. D., Eveleigh, T., Holzer, T. H., Sarkani, S. (2013). Risk identification biases and their impact to space system development project performance. *Engineering Management Journal*, 25(2), 3–12. <https://doi.org/10.1080/10429247.2013.11431970>
12. Jiang, J., Klein, G. (2000). Software development risks to project effectiveness. *The Journal of Systems and Software*, 52(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/S0164-1212\(99\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S0164-1212(99)00128-4)
13. Jiang, J., Klein, G., & Discenza, R. (2001). Information systems success as impacted by risks and development strategies. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(1), 46–55. <https://doi.org/10.1109/17.913165>
14. Raz, T., Shenhar, A. J., Dvir, D. (2002). Risk management, project success, and technological uncertainty. *R&D Management*, 32(2), 101–109. <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00243>
15. Wallace, L., Keil, M. (2004). Software project risks and their effect on outcomes. *Communications of the ACM*, 47(4), 68–73. <https://doi.org/10.1145/975817.9758>
16. Wallace, L., Keil, M., Rai, A. (2004). Understanding software project risk: a cluster analysis. *Information Management*, 42(1), 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.12.007>
17. Han, W. M., Huang, S. J. (2007). An empirical analysis of risk components and performance on software projects. *Journal of Systems and Software*, 80(1), 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.04.030>
18. Jill Willard, James Hutson (2024). Fail Fast, Fail Small: Designing Resilient Systems for the Future of Software Engineering. *International Journal of Recent Engineering Science*, 11 (5), 51-58. <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V11I5P106>
19. Filippo Poltronieri, Mauro Tortonese, Cesare Stefanelli (2021). ChaosTwin: A Chaos Engineering and Digital Twin Approach for The Design of Resilient IT Services. *2021 17th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 234-238. <https://doi.org/10.23919/CNSM52442.2021.9615519>
20. C. Konstantinou, G. Stergiopoulos, M. Parvania, P. Esteves-Verissimo (2021). Chaos Engineering for Enhanced Resilience of Cyber-Physical Systems. *2021 Resilience Week (RWS)*, 1-10. <https://doi.org/10.1109/RWS52686.2021.9611797>
21. Yongqing Zhu, Kiam Cheng How, Horng Jyh Wu, Qi Cao (2023). AI-based Proactive Storage Failure Management in Software-Defined Data Centres. In Proceedings of the 2023 6th International Conference on Information Science and Systems (ICISS '23), 231–237. <https://doi.org/10.1145/3625156.3625190>
22. Alessio Diamanti, José Manuel Sánchez Vilchez, Stefano Secci (2022). An AI-Empowered Framework for Cross-Layer Softwarized Infrastructure State Assessment. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19 (4), 4434-4448. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2022.3161872>
23. ISO. (2018). ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines. International Organization for Standardization.
24. Hillson D (2014). How to manage the risks you didn't know you were taking. PMI® Global Congress 2014—North America, Phoenix, AZ. Newtown Square, PA: Project Management Institute.
25. Elms D.G. (2004) Structural safety: Issues and progress. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6 (2), 116–126. <https://doi.org/10.1002/pse.176>
26. Frank M. (1999) Treatment of uncertainties in space nuclear risk assessment with examples from Cassini mission implications. *Reliability Engineering & System Safety*, 66 (3), 203–221. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(99)00002-2)
27. Randy Heffernan (2021). Monte Carlo Simulation Provides Insights to Manage Risks. Risk Management Magazine. <https://www.rmmagazine.com/articles/article//2021/05/28/monte-carlo-simulation-provides-insights-to-manage-risks>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-25>

УДК 004.056:004.9:623.44

Кунанець Наталія Едуардівна, д.н.с.к., професор

<https://orcid.org/0000-0003-3007-2462>

Яримович Юрій Андрійович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0006-1391-3214>

Національний університет «Львівська політехніка», м Львів, Україна

СТВОРЕННЯ СМАРТ-КОНТРАКТІВ У ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ОБЛІКУ ПРОДАЖУ ЗБРОЇ

Кунанець Н.Е., Яримович Ю.А. Створення смарт-контрактів у інформаційній системі обліку продажу зброї.

У статті проаналізовано можливості платформи Ethereum для розроблення та впровадження смарт-контрактів в інформаційній системі обліку продажу зброї. Розглянуто архітектуру платформи, механізми забезпечення прозорості, безпеки та достовірності даних у процесах купівлі-продажу. Особлива увага приділена аналізу ключових компонентів платформи, таких як Ethereum Virtual Machine (EVM) та механізм консенсусу Proof of Stake, які забезпечують децентралізовану та захищену основу для роботи смарт-контрактів. Досліджено потенціал смарт-контрактів для автоматизації ключових етапів обліку, включаючи перевірку дозволів на придбання зброї, реєстрацію угод, контроль дотримання законодавчих норм і відстеження змін у даних у реальному масштабі часу. Визначено переваги використання блокчейн-технологій, серед яких — незмінність записів, доступність для аудиту в режимі реального часу, підвищена прозорість операцій і мінімізація людського фактору. Окремо підкреслено, що інтеграція блокчейну дозволяє створити надійні механізми запобігання несанкціонованому доступу, фальсифікації даних і шахрайству. Розглянуто приклади реалізації смарт-контрактів у системі обліку продажу зброї та описано, як автоматизація цих процесів може сприяти зменшенню адміністративного навантаження. Водночас у статті висвітлено ключові виклики впровадження системи, включаючи питання масштабованості мережі, забезпечення конфіденційності персональних даних користувачів, адаптацію існуючих законодавчих норм до блокчейн-рішень і підвищення рівня довіри між учасниками системи. Запропоновано можливі напрями подальших досліджень, зокрема щодо інтеграції смарт-контрактів з іншими цифровими технологіями для забезпечення комплексного підходу до обліку та моніторингу. Результати роботи демонструють високий потенціал використання платформи Ethereum для підвищення ефективності та прозорості процесів у сфері контролю обігу зброї. Інтеграція смарт-контрактів із сучасними інформаційними системами обліку відкриває нові можливості для створення надійних і безпечних рішень, які відповідають викликам цифрової епохи.

Ключові слова: Ethereum, смарт-контракти, облік продажу зброї, блокчейн, інформаційна система, безпека даних, автоматизація, Solidity

Kunanets N., Yarymovych Y. Creation of Smart Contracts in the Information System for Arms Sales Accounting.

The article analyzes the capabilities of the Ethereum platform for developing and implementing smart contracts in an information system for arms sales accounting. The architecture of the platform, the features of the Solidity programming language, and mechanisms for ensuring transparency, security, and data integrity in purchase and sale processes are examined. The potential of smart contracts for automating key accounting stages, including permit verification, transaction registration, and compliance with legal regulations, is explored. The advantages of using blockchain technologies are identified, including immutability of records, real-time transaction auditing, and minimization of human error. Challenges associated with system implementation are outlined, particularly issues of scalability, data confidentiality, and legal compliance. The study demonstrates the prospects of integrating Ethereum to enhance the efficiency and transparency of processes in arms control systems.

Keywords: Ethereum, smart contracts, arms sales accounting, blockchain, information system, data security, automation, Solidity.

Постановка наукової проблеми. Сучасні підходи до обліку продажу зброї стикаються з низкою викликів, серед яких — необхідність забезпечення прозорості, надійності та відповідності законодавчим нормам під час реєстрації та контролю транзакцій. Традиційні інформаційні системи часто вразливі до несанкціонованого доступу, маніпуляцій даними та людських помилок. У цьому контексті використання блокчейн-технологій, платформи Ethereum, відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки процедур обліку продажу зброї.

Ethereum, завдяки своїй децентралізованій архітектурі та можливості створення смарт-контрактів, дозволяє автоматизувати ключові етапи процесу: від перевірки дозволів до реєстрації угод і контролю за їх виконанням. Однак впровадження таких технологій супроводжується низкою викликів, включаючи питання масштабованості, забезпечення конфіденційності даних та дотримання юридичних вимог.

Наукова проблема полягає у визначенні потенціалу та обмежень використання платформи Ethereum при створенні інформаційних систем та використанні у них смарт-контрактів для автоматизації процедур обліку продажу зброї, а також у розробленні рекомендацій щодо їх ефективної інтеграції для забезпечення прозорості, безпеки та відповідності нормативно-правовим вимогам.

Аналіз досліджень. Тема впровадження смарт-контрактів на платформі Ethereum в інформаційних системах отримала значний розвиток у контексті підвищення прозорості, безпеки та автоматизації бізнес-процесів. Сучасні дослідження акцентують увагу на можливостях Ethereum як однієї з найбільш популярних блокчейн-платформ для розроблення смарт-контрактів завдяки її децентралізованій архітектурі, підтримці мови програмування Solidity та здатності до угод, які можуть виконуватись самостійно. Дослідження, проведені вченими, такими як Emma Lawrence [1], підкреслюють важливість смарт-контрактів у забезпеченні прозорості та неможливості зміни вже зафіксованих транзакцій. Технологія блокчейн, яка спочатку була розроблена як базова структура для таких криптовалют, як біткойн, перетворилася на фундаментальний інструмент для безпечних, прозорих і децентралізованих транзакцій у багатьох галузях. Одним із найбільш перспективних застосувань технології блокчейн є використання смарт-контрактів, самовиконуваних контрактів з умовами угоди, записаними безпосередньо в рядки коду. Ці технології пропонують значний потенціал для зниження транзакційних витрат, підвищення прозорості та уникнення шахрайства, що має вирішальне значення в таких секторах, як фінанси, управління ланцюгами поставок, охорона здоров'я та юридичні послуги. Blockchain забезпечує децентралізовану та незмінну систему реєстру, де всі транзакції реєструються безпечним і захищеним від втручання способом. Ця функція робить його дуже цінним для галузей, які покладаються на довіру, таких як банківська справа, нерухомість і логістика. Децентралізований характер блокчейна усуває потребу в посередниках, скорочує час і витрати на транзакції, забезпечуючи при цьому цілісність даних. Дослідники відзначають, що нові рішення для боротьби з обмеженою масштабованістю Ethereum мають враховувати дисбаланс активності, у результаті системи на основі блокчейну можуть гарантувати більш високий рівень безпеки, відстежуваності та підзвітності порівняно з традиційними системами. Смарт-контракти розширюють концепцію блокчейна, автоматизуючи виконання контрактів. Ці самовиконувані контракти автоматично виконують дії на основі попередньо визначених умов, не вимагаючи втручання людини [2]. У працях Хрестідіс К. і Девецікіотіс М. розглянуто роль смарт-контрактів у спрощенні та автоматизації бюрократичних процедур, включаючи перевірку дозволів, реєстрацію транзакцій і контроль за виконанням нормативних вимог. На думку дослідників, блокчейн — це технологія, яка швидко розвивається, і стає ключовим інструментом економіки. У статті представлено блокчейн і смарт-контракт для конкретного домену, яким є нерухомість та детальний дизайн смарт-контракту, варіанти їх використання для оренди житлових і бізнес-будинків [3].

Попри очевидні переваги, проблема масштабованості залишається ключовим викликом для Ethereum. Дослідження Чжан Ф. [4] демонструють обмеження продуктивності мережі під час опрацювання великої кількості транзакцій, що є критичним фактором для інтеграції у великі інформаційні системи. Технологія блокчейн зменшує залежність від централізованого органу для сертифікації цілісності інформації та права власності, а також посередництва транзакцій та обміну цифровими активами, одночасно забезпечуючи безпечні та псевдоанонімні транзакції разом із угодами безпосередньо між взаємодіючими сторонами. Вона володіє такими ключовими властивостями, як незмінність, децентралізація та прозорість, які потенційно вирішують нагальні проблеми в охороні здоров'я, такі як неповні записи під час надання медичної допомоги та ускладнений доступ до інформації про здоров'я пацієнтів. Міллер А. вважає, що ефективна та результативна система охорони здоров'я потребує взаємодії, яка дозволяє програмному забезпеченню та технологічним платформам безпечно та безперервно спілкуватися, обмінюватися даними та використовувати дані, якими обмінюються між організаціями охорони здоров'я та постачальниками програм. У галузі охорони здоров'я за наявності ізольованих і фрагментованих даних, Blockchain сприяє забезпеченню зручного доступу і захисту від несанкціонованого втручання до медичних записів. Питання забезпечення конфіденційності у блокчейн-системах досліджували Бенет Дж. [5] та Косба А. [6], які акцентували увагу на необхідності балансу між прозорістю транзакцій та захистом конфіденційних даних, що є особливо важливим у системах обліку продажу зброї. Дослідники описали архітектуру блокчейну з квантовою підтримкою на основі консорціуму квантових серверів. Розроблена мережа є гібридною, використовує цифрові системи для обміну та опрацювання класичної інформації в поєднанні з оптично-волоконною інфраструктурою, квантовими пристроями для передачі та опрацювання квантової інформації. Дослідниками розглянуто деякі ключові вразливості, проаналізовано сумісність блокчейн-систем з квантовим Інтернетом і технологіями квантових обчислень.

Нові системи розумних контрактів ґрунтуються на децентралізованих криптовалютах і дозволяють сторонам, які не довіряють один одному, безпечно здійснювати транзакції без довірених третіх сторін [7]. Дослідники відзначають, що існуючим системам бракує конфіденційності транзакцій. Запропонована групою дослідників [8] інформаційна система Hawk використовує децентралізовану систему смарт-контрактів, яка не зберігає фінансові транзакції у відкритому вигляді, фіксує їх в блокчейні, таким чином зберігаючи конфіденційність транзакцій. Для Hawk написані смарт-контракти без використання криптографії, а компілятор системи автоматично генерує ефективний криптографічний протокол, у якому договірні сторони взаємодіють із блокчейном, використовуючи криптографічні примітиви, такі як докази з нульовим знанням.

Отже, аналіз наукових джерел засвідчує, що блокчейн має значний потенціал для інтеграції у інформаційні системи обліку продажу зброї. Проте існують виклики, такі як масштабованість, конфіденційність даних і відповідність юридичним вимогам, які вимагають подальших досліджень та розробки ефективних рішень.

Мета роботи. Метою дослідження є проаналізувати можливості платформи Ethereum для розроблення та впровадження смарт-контрактів в інформаційній системі обліку продажу зброї, визначити переваги, виклики та перспективи їх використання для забезпечення прозорості, безпеки та ефективності процесів купівлі-продажу.

Завдання статті:

1. Проаналізувати підходи до використання платформ блокчейну та смарт-контрактів.
2. Визначити переваги застосування смарт-контрактів у системі обліку продажу зброї, зокрема прозорість, безпеку та автоматизацію процесів.
3. Сформуувати архітектуру платформи Ethereum та її можливості для створення смарт-контрактів.
4. Визначити вимоги до інформаційної системи.

Виконання цих завдань дозволить сформуувати цілісне уявлення про потенціал платформи Ethereum у контексті розвитку інноваційних рішень для автоматизації та прозорості процесів обліку продажу зброї.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Переваги використання розумних контрактів. Розумні контракти є комп'ютерними програмами, що зберігаються в блокчейні та запускаються, коли визначені заздалегідь умови виконуються. Вони призначені для полегшення фінансових операцій між користувачами блокчейну, без потреби в надійних посередниках, що характеризує традиційні фінанси [9]. Завдяки відкритому коду розумні контракти вважаються головним джерелом інновацій. Розрізняють різні категорії розумних контрактів в залежності від предметної галузі, в якій використовуються. Категорії смарт-контрактів відображають їхню універсальність та широке застосування в різних сферах. Завдяки прозорості, автоматизації та безпеці смарт-контракти стали ключовою технологією для побудови децентралізованих систем, таких як системи обліку продажу зброї, і включають прозорість, безпеку та автоматизацію процесів обліку. Усі дії, пов'язані з продажем зброї, записуються у блокчейн, що забезпечує високий рівень прозорості та довіри, адже ці записи неможливо змінити. Усі транзакції, включно з фінансовими, у запропонованій інформаційній системі відбуваються між псевдонімами та сумою транзакції, і відображаються в блокчейні. У разі порушення або розірвання контракту блокчейн гарантує, що сторони отримають відповідну компенсацію.

Запис дій у блокчейн для забезпечення прозорості та довіри формально подамо так:

$$B = \sum_{i=1}^n T_i + H(B_{prev}),$$

де B - новий блок у блокчейні, що містить записи про дії, пов'язані з продажем зброї. T_i - i -та транзакція, яка містить інформацію про певну дію (наприклад, продаж, перевірку або передачу зброї). $i=1,2,\dots,n$, де n - кількість транзакцій у блоці. $H(B_{prev})$ - хеш попереднього блоку, що забезпечує зв'язок між блоками та незмінність записів.

Цей хеш додається до нового блоку для збереження цілісності ланцюга. Дані, записані у блокчейн, є незмінними, оскільки зміна однієї транзакції потребувала б змін усіх наступних блоків через хешування. Усі транзакції T_i доступні для перевірки учасниками мережі, що гарантує довіру до системи.

Припустимо, що в одному блоці B записані три транзакції (T_1, T_2, T_3) , які стосуються продажу зброї, формально це виглядатиме так:

$$B = (T_1 + T_2 + T_3) + H(B_{prev})$$

Це забезпечує прозорість і неможливість зміни інформації про продаж зброї. Покупці, продавці та регулюючі органи можуть перевіряти інформацію про угоду, таку як дата продажу, серійний номер зброї або відповідність ліцензій. Усі транзакції зберігаються у розподіленій системі, що дозволяє авторизованим сторонам отримувати доступ до даних у режимі реального часу.

Безпека гарантується криптографічними методами блокчейну, які захищають від фальсифікації дані про угоди. Смарт-контракти гарантують доступ до інформації лише для авторизованих осіб, таких як ліцензовані продавці, покупці або регулятори. Автоматизована верифікація учасників угоди, включно з перевіркою ліцензій, може виконуватись у реальному масштабі часу. Усі дані про транзакції зберігаються у децентралізованій мережі, що мінімізує ризик злому або втрати інформації.

Автоматизація процесів дозволяє смарт-контрактам автоматично виконувати умови угоди, такі як перевірка ліцензії покупця, оплата та реєстрація зброї в базі даних, що зменшує потребу в ручному втручанні. Завдяки автоматизації знижуються ризики людських помилок, таких як недостатня перевірка документів або невірна реєстрація. Транзакції здійснюються майже миттєво після виконання всіх умов, таких як перевірка покупця та оплата. Смарт-контракти також можуть автоматично передавати інформацію про продаж зброї до відповідних регуляторних органів, спрощуючи процеси звітності.

Робота смарт-контракту у системі обліку продажу зброї включає декілька етапів. Покупець ініціює транзакцію через платформу, після чого смарт-контракт перевіряє ліцензію покупця та статус зброї (чи вона не знаходиться у розшуку). Після підтвердження умов угоди покупець здійснює оплату, яка блокується у смарт-контракті. Продавець передає товар, що підтверджується відповідним записом у системі, після чого оплата розблоковується та передається продавцю. Наприкінці смарт-контракт автоматично надсилає звіт до регуляторних органів.

Для дотримання правових норм смарт-контракти адаптуються до місцевого та міжнародного законодавства щодо обліку продажу зброї. Регулярний аудит смарт-контрактів забезпечує їхню відповідність чинним нормам. Навчання користувачів включає проведення тренінгів для продавців і адміністраторів, а також надання інструкцій для ефективного використання системи у правовому полі.

Таким чином, впровадження смарт-контрактів сприяє підвищенню ефективності, безпеки, прозорості та надійності системи обліку продажу зброї, що дозволяє знизити ризики шахрайства, оптимізувати адміністративні процеси та забезпечити відповідність правовим нормам.

Приклад роботи смарт-контракту (псевдокод)

solidity

Копіювати код

```
pragma solidity ^0.8.0;
```

```
contract WeaponSale {
    address public regulatoryAuthority;
    mapping(address => bool) public verifiedBuyers;

    constructor(address _regulatoryAuthority) {
        regulatoryAuthority = _regulatoryAuthority;
    }

    function verifyBuyer(address buyer, uint age, bool hasPermit) public {
        require(msg.sender == regulatoryAuthority, "Only the regulatory authority can verify buyers");
        if (age >= 21 && hasPermit) {
            verifiedBuyers[buyer] = true;
        }
    }

    function registerSale(address buyer, string memory weaponId) public {
        require(verifiedBuyers[buyer], "Buyer is not verified");
        // Logic to register the sale and store in the blockchain
    }
}
```

```
function generateReport() public view returns (string memory) {
    // Logic to compile and return a report of all sales
}
```

Продавець перед проведенням процедури продажу має можливість перевірити покупця і підтвердити його право на покупку. Смарт-контракт автоматично реєструє продаж та зберігає інформацію у блокчейні. Смарт-контракт у системі обліку продажу автоматично виконує операції, пов'язані з реєстрацією угоди та збереженням інформації у блокчейні, завдяки чітко запрограмованим умовам і діям. Ось як відбувається цей процес:

Ініціація продажу полягає в тому, що покупець створює запит на покупку (наприклад, із зазначенням ідентифікатора товару, свого особистого ідентифікатора та підписом), смарт-контракт активується й перевіряє всі необхідні дані.

Перевірка умов передбачає, що смарт-контракт перевіряє вік та дозвіл покупця (можливо, шляхом запиту до верифікаційної бази даних), достовірність цифрового підпису, який підтверджує, що запит дійсно надійшов від зазначеного покупця.

Реєстрація транзакції відбувається якщо всі умови виконані, смарт-контракт автоматично реєструє факт продажу. Інформація про угоду записується у блокчейн, включаючи ідентифікатор товару (наприклад, виду зброї), ідентифікатор покупця (анонімізовані дані для збереження конфіденційності, якщо необхідно), мітку часу транзакції.

Зберігання даних досягає коректності завдяки децентралізованій природі блокчейну, дані зберігаються у незмінному вигляді. Після запису даних про продаж вони стають доступними для перевірки, але не можуть бути змінені або видалені.

Звітність передбачає, що смарт-контракт може бути запрограмований на автоматичне створення звітів для контролюючих органів. Ці звіти можуть бути доступні лише певним авторизованим користувачам, чий ключі дозволяють розшифрувати ці дані.

Приклад запиту

```
{
  "request_id": "12345",
  "buyer_id": "buyer_789",
  "item_id": "weapon_456",
  "quantity": 1,
  "timestamp": "2024-11-01T15:30:00Z",
  "signature": "..."
}
```

Розглянемо основні компоненти запиту:

`request_id`: - унікальний ідентифікатор запиту на покупку, який дозволяє системі відстежувати окремі запити.

`buyer_id`: - ідентифікатор покупця, який був виданий системою обліку. Він визначає покупця, що здійснює запит.

`item_id`: - ідентифікатор зброї або об'єкта, який покупець бажає придбати. Це може бути номер у каталозі або код товару.

`quantity`: - кількість одиниць зброї, яку покупець бажає придбати.

`timestamp`: - час створення запиту у форматі UTC. Це допомагає зберігати хронологічну точність транзакцій.

`signature`: - цифровий підпис, створений покупцем з використанням його приватного ключа. Підпис генерується для всього запиту, включаючи дані, що підлягають захисту, для забезпечення автентичності та цілісності.

Таким чином, використання смарт-контрактів у системі обліку продажу зброї забезпечує прозорість угод, захист даних, мінімізацію ризиків шахрайства та підвищує ефективність системи, знижуючи витрати часу та зусиль і забезпечуючи відповідність законодавчим нормам.

Блокчейн-платформа Ethereum. Існує декілька блокчейн-платформ для розроблення застосунків з використанням технології блокчейн. Їх можна класифікувати на відкриті та комерційні[10]. Ethereum є децентралізованою блокчейн-платформою, що забезпечує можливість створення та виконання смарт-контрактів — автономних програм, які автоматично виконуються при дотриманні заданих умов з відкритим кодом для децентралізованих програм. Ethereum — це

блокчейн-платформа, яка підтримує розумні контракти. Розумні контракти — це частини коду, які виконують обчислення загального призначення. Наприклад, смарт-контракти використовувалися для впровадження краудфінансових ініціатив, які зібрали 6,2 мільярда доларів США з січня по червень 2018 року [2].

Серед основних переваг Ethereum є можливість інтегрувати та використовувати смарт-контракти, тобто фрагменти коду, які забезпечують обмін цифровими активами між кількома агентами та виконання коду через розподілені програми. Ethereum також має швидке виробництво блоків, що забезпечує високу швидкість підтвердження транзакцій щодо Bitcoin та інших мереж. Крім того, вона не контролюється жодним центральним органом управління, тобто мережа Ethereum повністю децентралізована, оскільки рішення приймаються консенсусом. Крім того, це публічна мережа, яка забезпечує повну відстежуваність і прозорість інформації з універсальним доступом до даних з будь-якої точки світу.

Ключовим компонентом архітектури платформи Ethereum є Ethereum Virtual Machine, смарт-контракти, децентралізовані застосунки, протокол консенсусу, токени, транзакції.

Формально архітектуру платформи Ethereum можна описати як функціональну залежність між основними компонентами, що взаємодіють між собою для забезпечення роботи системи:

$Ethereum = \{EVM, SC, DApps, PoS, Tokens, TA\}$,

де EVM – Ethereum Virtual Machine, віртуальна машина для виконання смарт-контрактів. SC – Смарт-контракти, програми, які автоматично виконуються на EVM. DApps – Децентралізовані додатки, що забезпечують інтерфейс користувача та інтеграцію зі смарт-контрактами. PoS – Протокол консенсусу Proof-of-Stake, який підтримує безпеку та стабільність мережі. Tokens – Токени стандартів ERC-20 та ERC-721, що використовуються для криптовалют та інших активів. TA-механізми транзакцій.

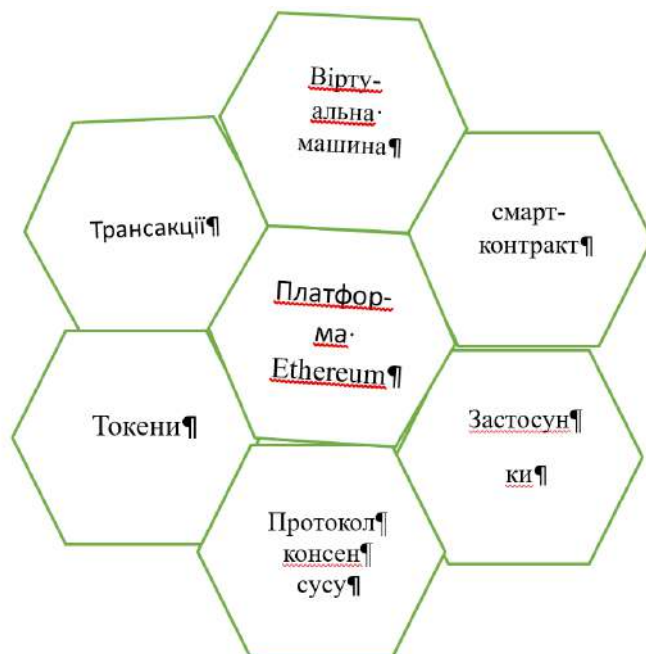


Рис.1. Складові платформи Ethereum

Формально взаємодію компонентів архітектури можна описати через функціонування EVM як основи виконання смарт-контрактів. Робота віртуальної машини може бути описана як виконання функцій смарт-контрактів у середовищі EVM:

$EVM(SC_i) = Execute(SC_i)$

де EVM- Ethereum Virtual Machine, платформа виконання смарт-контрактів. SC_i - смарт-контракт, що є автономною програмою, збереженою у блокчейні Ethereum. $Execute(SC_i)$ - процес виконання коду смарт-контракту у середовищі EVM.

EVM отримує смарт-контракт SC_i , виконує його код і повертає результат виконання. EVM інтерпретує код смарт-контракту, написаний мовою програмування Solidity, компілюючи його у байт-код, зрозумілий для EVM. Код компілюється у формат, який EVM може виконувати. EVM виконує смарт-контракти в ізольованому середовищі, що забезпечує безпеку. Наявність у кодi

помилки не впливає на загальну мережу Ethereum. Смарт-контракти виконують логіку, закладену у кодї, яка може включати зміни стану (додавання даних у блокчейн), виклики інших смарт-контрактів, проведення обчислень. Кожна операція, виконана EVM, споживає певну кількість обчислювальних ресурсів (Gas). Gas це термін, який використовується для позначення одиниці вимірювання обчислювальної роботи, необхідної для виконання транзакцій або смарт-контрактів у мережі. З англійської "gas" перекладається як "паливо", і використовується метафорично для опису ресурсу, який споживається для виконання операцій у мережі Ethereum. Ідея полягає в тому, що для роботи смарт-контрактів або транзакцій потрібна певна кількість "палива" (обчислювальних ресурсів), які оплачуються у криптовалюті Ether (ETH). Gas дозволяє обмежити кількість обчислювальних ресурсів, які може використовувати транзакція, запобігаючи можливим атакам (наприклад, нескінченним циклам у кодї). Оплата за gas стимулює вузли мережі Ethereum виконувати транзакції, оскільки майнери чи валідатори отримують компенсацію за обчислення. Загальна кількість Gas_{total} , необхідна для виконання певної транзакції або смарт-контракту, дорівнює сумї газу, спожитого кожною окремою операцією $Gas_{operation}$ в рамках цієї транзакції.

$$Gas_{total} = \sum_{j=1}^m Gas_{operation_j}$$

де $Gas_{operation_j}$ - кількість обчислювальних ресурсів, необхідна для виконання j -ї операції, m – кількість операцій у смарт-контракті.

Кожна операція в смарт-контракті або транзакції (наприклад, додавання, збереження даних, виклик функції) має фіксовану або обчислювану вартість у обчислювальних одиницях. Вартість операцій визначається у специфікації Ethereum. Після завершення виконання смарт-контракту EVM повертає зміну стану блокчейну, дані або повідомлення користувачу, а також інформацію про використаний ресурс. Переваги виконання в EVM включають безпеку, яка гарантується ізоляцією середовища при відсутності впливу виконання одного смарт-контракту на інші частини системи. Детермінованість означає, що результат виконання смарт-контракту є передбачуваним і не залежить від зовнішніх факторів. Масштабованість дозволяє EVM підтримувати одночасне виконання багатьох смарт-контрактів, а платформна незалежність забезпечує однакову роботу EVM на всіх вузлах мережі Ethereum. Якщо смарт-контракт SC_1 має функцію Solidity код її реалізації подамо так:

```
function add(uint a, uint b) public pure returns (uint) {
    return a + b;
}
```

Тоді виклик функції у середовищі EVM з параметрами $a=3$, $b=5$ може бути описаний як:

$EVM(SC_1) \rightarrow Execute(SC_1) \rightarrow Result=8$

EVM виконує код, обчислює суму, і результат 8 записується у відповідь.

EVM є фундаментальним компонентом Ethereum, який забезпечує виконання смарт-контрактів із високим рівнем безпеки, передбачуваності та ефективності.

Проаналізуємо взаємодію смарт-контрактів та DApps. Децентралізовані застосунки використовують смарт-контракти через їх виклики:

$DApps \rightarrow SC:Invoke(SC)$,

де DApps - децентралізовані застосунки, програми, які працюють на базі блокчейну Ethereum та надають користувачам доступ до функціоналу смарт-контрактів через зручний інтерфейс (веб або мобільний). DApps забезпечують інтерфейс між користувачем і смарт-контрактом, абстрагуючи технічні деталі. SC - смарт-контракт, автономна програма, розміщена в блокчейні Ethereum, яка автоматично виконує код при виклику, якщо дотримуються умови, закладені у програму. Смарт-контракт виконує логіку, яка може включати транзакції, опрацювання даних, перевірку умов тощо. Invoke(SC) - виклик смарт-контракту. Це процес передачі запиту до смарт-контракту з інструкцією виконання певної функції. Під час виклику передаються дані (наприклад, параметри функції); кошти (ETH або токени, якщо це передбачено смарт-контрактом). Запит ініціюється децентралізованим застосунком DApps, і передається смарт-контракту SC.

Розглянемо як працює ця взаємодія. Спершу відбувається ініціація запиту користувачем через DApps. Користувач, працюючи із DApps, наприклад, гаманцем Ethereum (Metamask), викликає функцію смарт-контракту. Далі натискає кнопку "Перевести токени" в інтерфейсі DApps і формує запит. DApps формує відповідь на запит, яка містить ідентифікатор смарт-контракту (адреса контракту в блокчейні), назву функції, яку потрібно викликати (наприклад, transfer), дані для

передачі функції (кількість токенів, адреса отримувача тощо), суму ETH або токенів (за потреби). Наступним кроком є відправка запиту до смарт-контракту. Виклик передається у блокчейн через транзакцію, яку підписує користувач. Цей запит відправляється до відповідного смарт-контракту. Відбувається виконання смарт-контракту. Смарт-контракт, отримавши запит, виконує вказану функцію, наприклад, переводить токени, змінює стан у блокчейні, викликає інші смарт-контракти. Виводяться результати виконання. Смарт-контракт повертає результат у вигляді зміни стану в блокчейні (наприклад, оновлення балансу), події (event), що повідомляє DApps про результат виконання. Останньою операцією є відображення результату в DApps. DApps отримує відповідь від смарт-контракту через події блокчейну або перевірку транзакції та оновлює інформацію для користувача.

Наведемо сценарій використання цієї взаємодія. Користувач хоче перевести токени через DApps. Користувач вводить кількість токенів та адресу отримувача в DApps і натискає "Перевести". DApps формує запит:

$\text{Invoke(SC)=transfer(address,amount)}$,

де address – адреса отримувача, amount – кількість токенів.

DApps передає цей запит у блокчейн. Смарт-контракт виконує функцію transfer, змінює баланс токенів і генерує подію Transfer. DApps отримує підтвердження про успішну транзакцію та показує його користувачу.

Перевагами взаємодії DApps і SC є прозорість, оскільки код смарт-контракту доступний для перевірки, що забезпечує довіру користувачів до його виконання. Автоматизація дозволяє смарт-контрактам виконуватися автоматично, без потреби в ручному втручанні. Безпека гарантується записом усіх дій у блокчейн, що робить їх незмінними. Універсальність DApps полягає в їхній здатності використовувати різні смарт-контракти для реалізації широкого спектру функціоналу. Ця формула демонструє, як децентралізовані застосунки слугують посередниками між користувачем та смарт-контрактами, забезпечуючи зручний і безпечний спосіб взаємодії з блокчейном.

Протокол консенсусу Proof-of-Stake (PoS) підтримує опрацювання транзакцій і забезпечує збереження даних у блокчейні:

$\text{PoS(Blocki)=Validate(Blocki)}$,

де PoS - протокол консенсусу Proof-of-Stake, який є механізмом, який використовується для досягнення згоди в децентралізованій мережі, зокрема блокчейні Ethereum. Він забезпечує перевірку транзакцій, створення нових блоків і захист мережі від атак. Blocki - i-й блок транзакцій. Блок у блокчейні – це сукупність транзакцій, даних або подій, які потрібно записати у блокчейн. Кожен блок має унікальний ідентифікатор (хеш), пов'язаний з попереднім блоком, що забезпечує цілісність даних. Validate(Blocki) - процес перевірки блоку. Ця операція включає перевірку правильності транзакцій, які містяться в блоці, та відповідності правил мережі (наприклад, наявність достатньої кількості стейків для підтвердження блоку) та додавання блоку до блокчейна після успішної валідації.

Робота Proof-of-Stake відбувається у декілька кроків.

Крок 1. Вибір валідатора.

У PoS валідатори вибираються для створення блоку на основі кількості криптовалюти, яку вони поставили на стейкінг (stake). Чим більше валідатор поставив на стейкінг, тим вища ймовірність, що він буде обраний для перевірки наступного блоку.

Крок 2. Перевірка блоку.

Обраний валідатор виконує перевірку блоку Blocki, яка включає перевірку всіх транзакцій у блоці на коректність, перевірку балансу облікових записів, що беруть участь у транзакціях, та генерацію нового хешу блоку, який прив'язує його до попереднього блоку.

Крок 3. Додавання блоку до блокчейна.

Якщо Blocki успішно перевірено, він додається до блокчейна. Інші вузли мережі отримують цей блок і погоджуються з його валідністю.

Крок 4. Нагорода валідатора.

Валідатор отримує винагороду (наприклад, у формі токенів) за успішну перевірку та додавання блоку.

Таким чином, роль PoS полягає у забезпеченні перевірки (Validate) кожного нового блоку в блокчейні. Успішна перевірка блоку (Blocki) дозволяє додати його до мережі, тим самим гарантуючи безпеку, оскільки валідація захищає блокчейн від фальшивих транзакцій. Цілісність досягається завдяки тому, що блоки додаються лише після перевірки їхньої коректності.

Децентралізацію передбачає, що валідація здійснюється кількома незалежними вузлами, які беруть участь у стейкінгу. Переваги PoS полягають у енергоефективності, оскільки PoS не потребує величезної обчислювальної потужності, як Proof-of-Work (PoW). Безпека гарантується високим рівнем стейкінгу, що мотивує валідаторів підтримувати чесність мережі. Масштабованість системи дозволяє PoS опрацьовувати більше транзакцій за одиницю часу, порівняно з іншими механізмами консенсусу.

Припустимо, у мережі Ethereum є блок $Block_1$, який містить 10 транзакцій. Тоді валідатор, обраний через механізм PoS, виконує перевірку цих транзакцій на коректність. Якщо всі транзакції дійсні, блок $Block_1$ додається до блокчейна. Код формули в цьому випадку виглядає так:

$PoS(Block_1) = \text{Validate}(Block_1) \rightarrow \text{Block}_1 \text{ додано до блокчейна}$

PoS підтримує функціонування блокчейна Ethereum, гарантуючи його безпеку, масштабованість і надійність. Токени формуються як активи на базі смарт-контрактів. Стандарти токенів ERC-20 та ERC-721 описуються як функції смарт-контрактів:

$Tokens = \{ERC_{20}(SC), ERC_{721}(SC)\}$,

де Tokens - сукупність цифрових активів, які функціонують на базі смарт-контрактів у мережі Ethereum. Токени є важливим елементом екосистеми Ethereum, оскільки вони є різноманітними цінностями, включаючи криптовалюти, сертифікати, права доступу чи цифрові активи. ERC-20(SC) - токени стандарту ERC-20, що визначають взаємозамінні активи. Кожен токен ERC-20 є ідентичним іншому в межах одного смарт-контракту.

Основна функція SC у цьому випадку – це набір правил, що визначають поведінку токенів, таких як трансфер - передачу токенів між обліковими записами, баланс - перевірка балансу токенів у гаманці, затвердження - надання дозволу іншій стороні з використанням токенів. ERC-721(SC) - токени стандарту ERC-721, які представляють невзаємозамінні активи. Кожен токен ERC-721 є унікальним, має свій ідентифікатор і його не можна обміняти на інший токен. Смарт-контракт SC забезпечує функції, пов'язані з невзаємозамінним токеном (Non-Fungible Token, NFT), такі як визначення власника токена, передача унікальних активів, управління правами. NFT - це унікальний цифровий актив, створений за допомогою технології блокчейн, який підтверджує право власності на конкретний об'єкт або актив. NFT відрізняються тим, що вони не взаємозамінні, на відміну від таких криптовалют, як Bitcoin чи Ether, які є взаємозамінними. Кожен NFT є унікальним і має власний ідентифікатор (зазвичай у вигляді хешу). Це означає, що жоден NFT не може бути повністю однаковим із іншим. Оскільки NFT існує в блокчейні, інформація про нього, включаючи право власності, записується у децентралізованому реєстрі, і ці дані не можуть бути змінені або видалені. На відміну від традиційних токенів чи валют, які є взаємозамінними (1 Bitcoin = 1 Bitcoin), NFT представляє унікальний актив, який не можна замінити на ідентичний. NFT підтверджує справжність та право власності на цифрові або фізичні активи. NFT створюються (або "мінтуються") за допомогою смарт-контрактів на блокчейні, зазвичай на платформі Ethereum. Основні стандарти для NFT ERC-721 - стандарт для унікальних токенів, ERC-1155 - удосконалений стандарт для створення як унікальних, так і масових токенів. NFT — це технологія, яка відкриває нові можливості для підтвердження автентичності, права власності та монетизації цифрових активів. Вони революціонізують способи взаємодії із цифровим контентом, мистецтвом, іграми та навіть фізичними активами.

Робота стандартів відбувається наступним чином. Припустимо є токени ERC-20, які представляють криптовалюту проекту. Функція смарт-контракту використовується для передачі 100 токенів на інший гаманець. Якщо токен ERC - невзаємозамінний токен він дозволяє створити NFT для цифрового зображення. Функція смарт-контракту використовується для перевірки, хто володіє цим унікальним токеном. Взаємозв'язок із блокчейном Ethereum забезпечується через смарт-контракти та токени як активи. Смарт-контракти реалізують функціонал токенів на Ethereum, забезпечуючи виконання умов передачі, контроль за балансом токенів та взаємодію з іншими контрактами й застосунками. Токени стандартизовані для зручності взаємодії між користувачами, застосунками та смарт-контрактами. ERC-20 забезпечує стандартизовані функції, які спрощують інтеграцію токенів у гаманці, біржі та застосунки, а їхня взаємозамінність робить ці токени ідеальними для криптовалют чи систем лояльності. ERC-721 завдяки своїй унікальності відкриває можливості для нових бізнес-моделей, таких як цифрові колекції, реєстрація активів або сертифікація.

Токени в Ethereum базуються на роботі смарт-контрактів, які стандартизують їхню поведінку та функціонал. Це створює основу для масштабованих, гнучких і прозорих цифрових

активів у децентралізованій мережі. Інтегровано архітектуру Ethereum можна подати як систему, де всі компоненти працюють у взаємодії:

$$\text{Ethereum} = \text{PoS}(\sum_{i=1}^n \text{EVM}(\text{SC}_i)) + \sum_{j=1}^m \text{DApps}(\text{SC}_j) + \sum_{k=1}^l \text{Tokens}(\text{SC}_k),$$

де n – кількість смарт-контрактів, що виконуються на EVM. m – кількість децентралізованих додатків, що взаємодіють зі смарт-контрактами. l – кількість токенів, створених за стандартами ERC-20 або ERC-721.

Компоненти Ethereum забезпечують децентралізовану, енергоефективну та гнучку платформу для розробки смарт-контрактів, застосунків і токенів. Розглянемо детальніше кожен з елементів. EVM надає ізольоване середовище для безпечного виконання коду смарт-контрактів. Програми для EVM пишуться мовою програмування Solidity, що забезпечує високу гнучкість і функціональність для розробників. Смарт-контракти зберігаються у блокчейні Ethereum і є важливим інструментом для автоматизації процесів, забезпечення прозорості та безпеки даних. Ethereum підтримує стандарти токенів, такі як ERC-20 для взаємозамінних токенів і ERC-721 для невзаємозамінних активів, що розширює можливості платформи для ідентифікації прав власності та управління цифровими активами. Крім того, архітектура платформи передбачає інтеграцію децентралізованих застосунків (DApps), які взаємодіють зі смарт-контрактами та забезпечують зручний користувацький інтерфейс для кінцевих користувачів. Протокол консенсусу PoS підвищує енергоефективність і масштабованість мережі, що є важливим фактором для стабільного функціонування платформи.

Ethereum пропонує низку можливостей для розроблення інформаційних систем, зокрема автоматизацію ключових процесів обліку, перевірку дозволів, реєстрацію угод і контроль дотримання законодавчих вимог. Смарт-контракти забезпечують прозорість транзакцій, оскільки всі зміни фіксуються у блокчейні та доступні для аудиту. Незмінність даних гарантує їх достовірність, а вбудовані механізми безпеки мінімізують ризик несанкціонованого доступу. Платформа дозволяє легко інтегруватися з іншими системами завдяки API та стандартним інтерфейсам.

Однак існують певні виклики, пов'язані з використанням Ethereum при розробленні смарт-контрактів. Масштабованість залишається однією з головних проблем, оскільки пропускна здатність мережі обмежена, що може призводити до затримок у транзакціях під час пікових навантажень. Вартість Gas, необхідного для виконання контрактів, також може бути високою, що обмежує доступність платформи для менш масштабних проєктів. Конфіденційність даних є ще однією проблемою, оскільки інформація в блокчейні є відкритою і доступною для всіх учасників мережі. Додатково слід враховувати юридичні аспекти впровадження, оскільки регуляторні вимоги можуть відрізнятися залежно від юрисдикції.

Незважаючи на ці виклики, Ethereum залишається однією з найпотужніших платформ для створення смарт-контрактів, що забезпечує ефективність, прозорість і безпеку інформаційних систем. Завдяки своїй архітектурі, автоматизації процесів та інтеграційним можливостям, Ethereum має значний потенціал для використання у складних і критично важливих сферах, таких як облік продажу зброї.

Вимоги до інформаційної системи обліку продажу зброї. На основі аналізу особливостей смарт-контрактів та платформи Ethereum можемо сформулювати вимоги до інформаційної системи обліку продажу зброї. Інформаційна система повинна забезпечувати прозорий механізм обліку всіх операцій купівлі-продажу зброї з можливістю аудиту в реальному часі. Інформація про транзакції має бути доступною для перевірки уповноваженими органами, зберігаючи конфіденційність персональних даних. Дані про транзакції, дозволи, угоди та реєстрації зброї повинні бути записані у блокчейн, забезпечуючи їх незмінність та захист від фальсифікації. Система повинна гарантувати високий рівень захисту даних користувачів та запобігати несанкціонованому доступу, зокрема, з використанням криптографічних методів для шифрування даних та підтвердження автентичності користувачів. Система має підтримувати автоматизацію ключових процесів через смарт-контракти, таких як перевірка дозволів на придбання зброї, реєстрація угод купівлі-продажу та контроль відповідності операцій нормативно-правовим вимогам. Смарт-контракти повинні виконуватись лише за умови дотримання всіх необхідних умов, включаючи перевірку особи та дозвільних документів. Важливим аспектом є масштабованість системи, що забезпечить підтримку великої кількості транзакцій без зниження продуктивності. Конфіденційність даних покупців і продавців також має бути гарантована за рахунок використання сучасних методів анонімізації та чіткого

розмежування доступу до інформації на основі ролей користувачів. Система повинна відповідати чинному законодавству щодо обігу зброї, захисту персональних даних та запобігання фінансуванню тероризму. Необхідно забезпечити можливість інтеграції з державними реєстрами, базами даних правоохоронних органів та іншими інформаційними системами. Архітектура повинна бути децентралізованою, щоб уникнути залежності від єдиного адміністратора або сервера, а також підтримувати механізми токенизації для управління правами на об'єкти, наприклад, створення цифрових токенів, які підтверджують право власності на зброю. Система має включати журнал подій для збереження всіх транзакцій та оновлень, забезпечуючи можливість моніторингу та аналізу. Вона повинна бути доступною на різних пристроях і платформах, забезпечуючи зручний інтерфейс для користувачів. Транзакції мають виконуватися з мінімальними затримками, навіть за високих навантажень. Також необхідно впровадити механізми резервного копіювання та швидкого відновлення даних у разі технічних збоїв. Система повинна бути гнучкою і масштабованою, з можливістю адаптації до нових вимог, розширення функціональності та інтеграції з іншими блокчейн-мережами. Ці вимоги дозволяють створити ефективну, надійну та безпечну інформаційну систему обліку продажу зброї, яка відповідає сучасним технологічним та нормативним стандартам.



Рис.1. Діаграма діяльності інформаційної системи обліку продажу зброї

Діаграма діяльності демонструє послідовність кроків, які виконує інформаційна система обліку продажу зброї. Кожен елемент діаграми представляє певний етап процесу, що забезпечує перевірку та реєстрацію транзакцій. Користувач або система ініціює запит на придбання зброї, який стає початковою точкою процесу. Система виконує перевірку цифрового підпису для встановлення автентичності запиту. Це допомагає визначити, чи є запит легітимним. Перевірка підпису на дійсність. На наступному етапі система перевіряє, чи є підпис дійсним. Якщо підпис недійсний,

запит завершується (гілка "Ні"). У разі успішної перевірки процес переходить до наступного етапу. Система аналізує надані дані про покупця, включаючи дозвільні документи, відповідність законодавчим нормам тощо. Після аналізу даних система перевіряє, чи відповідає покупець усім вимогам. У разі невідповідності запит завершується (гілка "Ні"). Якщо дані відповідають вимогам, процес триває. У разі відповідності всім вимогам контролюючий орган підтверджує операцію. Після підтвердження система реєструє транзакцію в базі даних або у блокчейні, забезпечуючи збереження даних про угоду. Заключним етапом є створення звіту, який може бути використаний для аудиту чи подальшого аналізу операцій.

Процес починається з ініціювання запиту та проходить кілька етапів перевірок. Якщо будь-який із критеріїв не виконується, запит завершується. У разі успішного проходження всіх етапів дані реєструються, і формується звіт. Ця діаграма відображає систематичний підхід до обліку продажу зброї, де важливими аспектами є перевірка, відповідність вимогам і прозорість операцій.

Проблема конфіденційності даних у інформаційній системі пов'язана з публічним доступом до інформації, де всі транзакції є відкритими, що може призводити до витоку конфіденційної інформації, зокрема адрес гаманців. Це зумовлено дизайном публічних блокчейнів, орієнтованих на прозорість, та відсутністю вбудованих механізмів шифрування даних. Вирішення цієї проблеми полягає у використанні процедур шифрування даних, приватних блокчейнів, міксерів для об'єднання транзакцій та технологій Zero-Knowledge Proofs, які дозволяють підтвердити транзакцію без розкриття деталей. Кожен вузол і дія представляють кроки, які виконуються у смарт-контракті або зовнішніх системах. Це дозволяє визначати альтернативні шляхи у процесі роботи і чітко візуалізувати логіку роботи інформаційної системи на основі Ethereum. Рис.1 відображає основні етапи процесу роботи, включаючи створення запиту на покупку, перевірку підпису, дозволів, даних про покупця, підтвердження реєстрації транзакції та генерацію звіту. Проблеми масштабованості, конфіденційності даних та ризику є ключовими аспектами при впровадженні технологій блокчейну. Обмежена пропускна здатність блокчейн-систем, таких як Bitcoin і Ethereum, є значною проблемою, оскільки вони можуть опрацювати обмежену кількість транзакцій за секунду. Наприклад, Bitcoin опрацювує близько 7 TPS, Ethereum — 15-30 TPS, у той час як централізовані системи, такі як Visa, опрацювають до 24 000 TPS. Основні причини цього обмеження включають ліміт розміру блоку та час, необхідний для досягнення консенсусу між вузлами. Можливими рішеннями є шардінг, що розподіляє блокчейн на частини для опрацювання транзакцій. Безпека системи посилюється через шифрування даних для захисту конфіденційної інформації, контроль доступу через багаторівневі механізми, що перевіряють права користувачів, та використання біометричних або цифрових підписів для ідентифікації учасників транзакцій. Підвищення надійності досягається завдяки дублюванню даних у децентралізованих вузлах, постійному оновленню інформації про транзакції та створенню резервних копій через смарт-контракти. Система забезпечує підвищення ефективності за рахунок швидкого опрацювання транзакцій, автоматизації процесів, зниження адміністративних витрат і інтеграції смарт-контрактів з іншими інформаційними системами, такими як державні реєстри.

Висновки. Ethereum є потужною платформою для створення децентралізованої інформаційної системи обліку продажу зброї, яка забезпечує високий рівень безпеки, прозорості та автоматизації. Водночас слід враховувати обмеження щодо масштабованості, витрат, потенційних вразливостей коду смарт-контрактів та необхідності забезпечення конфіденційності. Завдяки інтеграції з розробленими сервісами додатково підвищено функціональність системи.

Платформа забезпечує досить високий рівень безпеки для контролю над записами транзакцій та автентичністю користувачів завдяки низці своїх архітектурних особливостей та криптографічних принципів. У статті проаналізовано можливості платформи Ethereum для розроблення та впровадження смарт-контрактів в інформаційну систему обліку продажу зброї, що дозволило сформулювати цілісне уявлення про її потенціал у цій сфері. Розглянуто архітектуру платформи, включаючи ключові компоненти, такі як Ethereum Virtual Machine (EVM), мова програмування Solidity та механізм консенсусу Proof of Stake, які забезпечують стабільне, децентралізоване та безпечне середовище для виконання смарт-контрактів.

Визначено, що використання смарт-контрактів дозволяє значно підвищити прозорість операцій, забезпечити безпеку даних і автоматизувати ключові етапи обліку, включаючи перевірку дозволів, реєстрацію угод та контроль за дотриманням законодавства. Особливу увагу приділено зниженню впливу людського фактора, що сприяє мінімізації помилок і шахрайства.

Водночас виявлено основні виклики впровадження блокчейн-технологій, серед яких проблеми масштабованості мережі, захисту конфіденційних даних користувачів і відповідності нормативно-правовим вимогам. Для їх подолання рекомендовано поступове впровадження технологій, розробку гнучких моделей для масштабування, забезпечення юридичної відповідності та створення додаткових механізмів захисту інформації.

Результати дослідження підтверджують, що платформа Ethereum має значний потенціал для підвищення ефективності інформаційних систем обліку продажу зброї. Її інтеграція сприятиме зростанню рівня довіри між учасниками ринку, забезпеченню прозорості операцій та вдосконаленню контролю за дотриманням нормативно-правових вимог. Таким чином, впровадження смарт-контрактів відкриває нові перспективи для створення інноваційних рішень у цій сфері.

Список бібліографічних описів

1. Lawrence Emma Blockchain and smart contracts for secure and transparent transactions / Lawrence Emma.-URL: https://www.researchgate.net/publication/386337137_Blockchain_and_smart_contracts_for_secure_and_transparent_transactions
2. Gustavo A. Oliva. An exploratory study of smart contracts in the Ethereum blockchain platform / Gustavo A. Oliva, Ahmed E. Hassan, Zhen Ming (Jack) Jiang. // Empirical Softw. Engg. – Dordrecht, 2020.-P. 1864–1904. <https://doi.org/10.1007/s10664-019-09796-5>
3. Christidis K. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things / Christidis K., Devetsikiotis M. // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2292–2303. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2566339>.
4. Blockchain Technology Use Cases in Healthcare / Zhang P., Schmidt D. C., White J., Lenz G. // Advances in Computers. – Elsevier. – 2018. – Vol. 111. – P. 1–41.
5. Bennet A. J Energy-Efficient Mining on a Quantum-Enabled Blockchain Using Light / Bennet A. J., Daryanoosh S. // Ledger. – 2019. – Vol. 4. – P. 82–107. – DOI: <https://doi.org/10.5195/ledger.2019.143>.
6. Mohanta Bhabendu An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology / Mohanta, Bhabendu, Panda, Soumyashree, Jena, Debasish. // 2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Bengaluru, India, 2018. - Bengaluru, 2018.-P. 1-4, doi: 10.1109/ICCCNT.2018.8494045.
7. Towards Model-Driven Engineering of Smart Contracts for Cyber-Physical Systems / Garamvölgyi P., Kocsis I., Gehl B., Klenik A. // Proceedings of DSN-W 2018. – 2018. – P. 134–139. – DOI: 10.1109/DSN-W.2018.00052.
8. Hawk: The Blockchain Model of Cryptography and Privacy-Preserving Smart Contracts / Kosba A., Miller A., Shi E., Wen Z., Papamanthou C. // IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Jose, CA, USA. – 2016. – P. 839–858. – DOI: 10.1109/SP.2016.55.
9. Benetti Z. Decentralised Finance: A Categorisation of Smart Contracts / Benetti Z., Piazza F. // ESMA Working Paper. – 2024. – No. 3. – P. 2–29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.006>.
10. Rosa-Bilbao J. Ethereum Blockchain Platform / Rosa-Bilbao J., Boubeta-Puig J. // Distributed Computing to Blockchain. – 2023. – P. 267–282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96146-2.00006-1>.

References

1. Lawrence Emma Blockchain and smart contracts for secure and transparent transactions / Lawrence Emma.-URL: https://www.researchgate.net/publication/386337137_Blockchain_and_smart_contracts_for_secure_and_transparent_transactions
2. Gustavo A. Oliva. An exploratory study of smart contracts in the Ethereum blockchain platform / Gustavo A. Oliva, Ahmed E. Hassan, Zhen Ming (Jack) Jiang. // Empirical Softw. Engg. – Dordrecht, 2020.-P. 1864–1904. <https://doi.org/10.1007/s10664-019-09796-5>
3. Christidis K. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things / Christidis K., Devetsikiotis M. // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2292–2303. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2566339>.
4. Blockchain Technology Use Cases in Healthcare / Zhang P., Schmidt D. C., White J., Lenz G. // Advances in Computers. – Elsevier. – 2018. – Vol. 111. – P. 1–41.
5. Bennet A. J Energy-Efficient Mining on a Quantum-Enabled Blockchain Using Light / Bennet A. J., Daryanoosh S. // Ledger. – 2019. – Vol. 4. – P. 82–107. – DOI: <https://doi.org/10.5195/ledger.2019.143>.
6. Mohanta Bhabendu An Overview of Smart Contract and Use Cases in Blockchain Technology / Mohanta, Bhabendu, Panda, Soumyashree, Jena, Debasish. // 2018 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Bengaluru, India, 2018. - Bengaluru, 2018.-P. 1-4, doi: 10.1109/ICCCNT.2018.8494045.
7. Towards Model-Driven Engineering of Smart Contracts for Cyber-Physical Systems / Garamvölgyi P., Kocsis I., Gehl B., Klenik A. // Proceedings of DSN-W 2018. – 2018. – P. 134–139. – DOI: 10.1109/DSN-W.2018.00052.
8. Hawk: The Blockchain Model of Cryptography and Privacy-Preserving Smart Contracts / Kosba A., Miller A., Shi E., Wen Z., Papamanthou C. // IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), San Jose, CA, USA. – 2016. – P. 839–858. – DOI: 10.1109/SP.2016.55.
9. Benetti Z. Decentralised Finance: A Categorisation of Smart Contracts / Benetti Z., Piazza F. // ESMA Working Paper. – 2024. – No. 3. – P. 2–29. – DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.006>.
10. Rosa-Bilbao J. Ethereum Blockchain Platform / Rosa-Bilbao J., Boubeta-Puig J. // Distributed Computing to Blockchain. – 2023. – P. 267–282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96146-2.00006-1>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-26>

УДК 330

Хілуха Оксана Анатоліївна, к.е.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1228-7171>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

УПРАВЛІННЯ КОРПОРАТИВНИМ STARLINK ПРОЕКТОМ

Хілуха О.А. Управління корпоративним Starlink проектом. Стаття присвячена аналізу корпоративного управління в контексті проекту Starlink, який є частиною глобальної стратегії SpaceX із створення глобальної супутникової інтернет-мережі. Зокрема, розглядаються потенційні можливості впровадження технології Starlink в Україні для розвитку інфраструктури космічних місій та наукових досліджень. Проект Starlink забезпечує надійний і високошвидкісний інтернет-зв'язок, що може бути використаний для управління супутниками, моніторингу космічних місій, а також для підключення в віддалених і важкодоступних регіонах, що особливо важливо для українських науковців та космічного агентства. Автори пропонують інтеграцію Starlink в національну інфраструктуру космічних місій України, зокрема через створення стійкого зв'язку між центрами управління місіями, а також забезпечення міжнародної координації та співпраці з іншими космічними агентствами та приватними компаніями. Крім того, стаття аналізує важливість використання таких цифрових технологій для підвищення ефективності управління та розвитку національних інтересів у сфері космічних технологій.

Ключові слова: Starlink, цифровізація, космічні місії, інфраструктура, супутниковий зв'язок, корпоративне управління, SpaceX, високошвидкісний інтернет.

Khilukha O. Corporate Governance in Starlink Projects. The article focuses on analyzing of corporate governance in the context of the Starlink project, which is part of SpaceX's global strategy to create a worldwide satellite internet network. Specifically, it examines the potential implementation of Starlink technology in Ukraine to develop the infrastructure for space missions and scientific research. The Starlink project provides reliable, high-speed internet connectivity that can be used for satellite management, space mission monitoring, as well as for connecting in remote and hard-to-reach areas, which is especially important for Ukrainian scientists and the space agency. The authors propose the integration of Starlink into Ukraine's national space mission infrastructure, particularly through the establishment of stable communication between mission, as well as ensuring international coordination and cooperation with other space agencies and private companies. Furthermore, the article analyzes the importance of using such digital technologies to enhance governance efficiency and support national interests in the field of space technology.

Keywords: Starlink, digitalization, space missions, infrastructure, satellite communication, corporate governance, SpaceX, high-speed internet.

Постановка наукової проблеми. В умовах глобалізації та зростаючої ролі космічних досліджень інтеграція інноваційних ІТ-рішень, таких як супутникові системи Starlink, має важливе значення для підвищення ефективності космічних місій, розвитку національної інфраструктури та забезпечення стратегічних інтересів України у сфері космічних технологій.

Особливого значення це дослідження набуває в контексті посилення міжнародної співпраці та участі України у спільних космічних проектах. Використання передових телекомунікаційних технологій, зокрема глобальної супутникової мережі Starlink, може забезпечити стійкий високошвидкісний зв'язок для наукових досліджень космосу, а також сприяти розвитку цифрової економіки та національної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Грицюк Ю.І. і Дяк Т. П. дослідили особливості використання інтернет-технологій для організації навчального процесу в університетах, акцентуючи на перевагах і недоліках їх застосування. Проаналізували можливості хмарних сервісів у сфері освіти та їх потенціал для поліпшення якості навчання. Зазначили, що впровадження цих технологій сприятиме зниженню витрат, підвищенню ефективності навчального процесу та розвитку розумових здібностей студентів у сучасному інформаційному суспільстві [1].

Калениченко Р. А. Коханець А. С. Скoviра О. П. розвинули особливості підтримки ділової репутації в мережі Інтернет. Виокремили напрямки підтримки ділової репутації в Інтернеті в контексті репутаційного менеджменту, розкривши її важливість для компаній та організацій [3]. Визначили можливості використання інструментів репутаційного менеджменту для створення та підтримки позитивного іміджу в онлайн-середовищі.

ІТ-технології тісно пов'язані з дослідженням космосу через необхідність розвитку супутникових систем, ракетно-космічної техніки, обробки великих даних та інтерфейсів для забезпечення комунікацій і моніторингу. ІТ є основним інструментом для управління космічними місіями, аналізу отриманих даних і забезпечення безпеки в космічній галузі. Смерічевський С. Ф. Михальченко О. А. запропонували авторську дефініцію економіки космосу як складової авіаційно-

космічного комплексу, досліджуючи її зв'язок із національною економікою та безпекою. Вивчили зовнішні і внутрішні аспекти економіки космосу [4].

Дослідження зарубіжних вчених присвячені SpaceX виробнику ряду ракет-носіїв, зокрема, сімейства Falcon та двигунів для них, а також космічних кораблів. SpaceX займається розробкою і запуском космічних ракет та кораблів. Серед її ключових проєктів – Falcon 9, багаторазова ракета-носій для запуску супутників, вантажів і астронавтів, Falcon Heavy, важка ракета для перевезення великих вантажів у космос, Dragon, космічний корабель для доставки вантажів і людей на Міжнародну космічну станцію (МКС), Starship, перспективна багаторазова ракета для колонізації Марса, повернення людей на Місяць (програма NASA Artemis) та міжпланетних польотів, а також Lunar Starship, версія Starship для висадки астронавтів на Місяць. Бейлор, М. дослідив, що найбільш значною особливістю Block 5 SpaceX є повністю багаторазовий перший ступінь, який здатний здійснювати два запуски протягом одного дня. Такі можливості допоможуть SpaceX впоратися з насиченим графіком запусків за безпрецедентно низькою вартістю. Таким чином, Block 5, SpaceX збільшить частоту запусків і знизить ціни [5].

У той же час Starlink є проєктом SpaceX зі створення глобальної супутникової інтернет-мережі, яка має забезпечити доступ до швидкісного інтернету навіть у найвіддаленіших кутках планети за допомогою тисяч низькоорбітальних супутників. М. Майденберг і Р. Вінклер дослідили, що Starlink стрімко зростає, але все ще далеко від цілей SpaceX. Оскільки глобальна ціль Starlink у дослідженні космосу є створення стійкої та високошвидкісної комунікаційної мережі, яка забезпечить зв'язок для майбутніх космічних місій [6].

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Дослідженням розвитку цифрових технологій та супутникового зв'язку присвячені праці багатьох українських та зарубіжних вчених. Проте, потребує додаткової уваги використання технологій Starlink для забезпечення надійного інтернет-зв'язку в умовах віддалених регіонів та для підтримки космічних місій в Україні, розвиток національної інфраструктури космічних місій. Зокрема, потрібно підкреслити важливість цього проєкту для космічного агентства України

Необхідно дослідити інтеграцію та координацію між Україною та міжнародними партнерами, зокрема в контексті спільних космічних місій, використання супутникових систем, таких як Starlink. Ці питання раніше не отримували такої комплексної уваги, особливо з точки зору їх безпосереднього впливу на інфраструктуру та розвиток космічних місій в Україні.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є аналіз взаємозв'язку між цифровізацією, інформаційними технологіями (ІТ) та розвитком космічної галузі, зокрема використання технологій, таких як супутникові системи Starlink, для покращення ефективності космічних місій та наукових досліджень в Україні. Стаття також ставить за мету управління корпоративним Starlink проєктом для розвитку інфраструктури космічних місій в Україні через інтеграцію сучасних ІТ-рішень, а також аналіз можливих перспектив і напрямів їхнього впровадження в контексті національної безпеки, економіки та євроінтеграції країни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розвиток інтернет технологій є ключовим фактором розвитку сучасного суспільства, оскільки сприяє економічному зростанню, підвищенню ефективності комунікації, розширенню освітніх можливостей та покращенню якості життя. Завдяки розвитку інтернет-технологій відбувається глобальна інтеграція ринків, спрощується доступ до інформації та знань, що стимулює інновації та науково-технічний прогрес. Оцифрування державних послуг сприяє прозорості управління, зменшенню бюрократії та підвищенню рівня соціальної захищеності громадян. Крім того, використання інтернету дозволяє ефективно вирішувати глобальні проблеми, такі як продовольча безпека, завдяки аналізу великих даних та штучному інтелекту. Водночас розвиток інтернет технологій забезпечує рівний доступ до можливостей незалежно від географічного розташування, соціального статусу чи рівня доходів. Таким чином, цифровізація є не лише технічним процесом, а й стратегічним напрямом розвитку, який сприяє сталому розвитку суспільства, підвищенню добробуту людей.

Проаналізуємо основні дані розвитку цифрових технологій (рис. 1- 3)

Гістограма рис.1 відображає статистичні дані щодо загальної кількості населення світу та кількості користувачів мобільних телефонів, інтернету та соціальних мереж. Загальна кількість населення складає 8,2 млрд осіб. Цей показник є основою для розрахунку частки користувачів мобільних телефонів, інтернету та соціальних мереж. Кількість користувачів мобільних телефонів – 5,78 млрд осіб (70,5%). Це свідчить про високу доступність мобільного зв'язку та широке його

використання у світі. Кількість користувачі інтернету складає 5,56 млрд осіб (67,9%). Показник майже співмірний із користувачами мобільних телефонів, що підтверджує значну цифрову інтеграцію та роль мобільного інтернету. Кількість користувачі соціальних мереж складає 5,24 млрд осіб (63,9%). Соціальні мережі охоплюють більшість інтернет-користувачів, що вказує на їх важливість у сучасному цифровому світі [8].

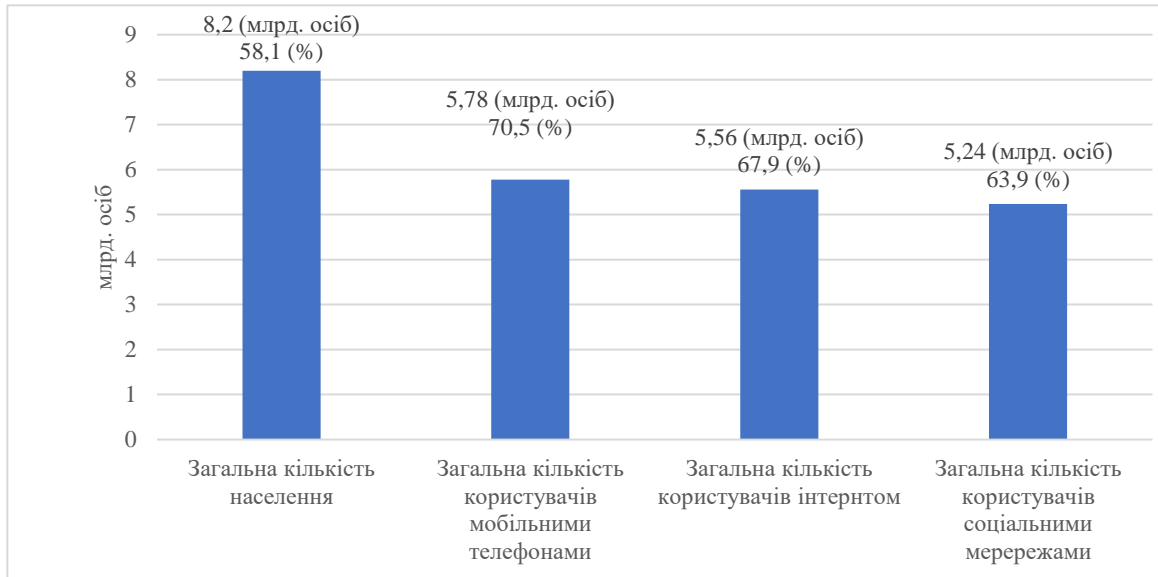


Рис. 1. Загальна кількість населення світу, користувачів мобільних телефонів, інтернету, соціальних мереж, млрд. осіб [8]

Висока частка користувачів мобільних телефонів свідчить про глобальну доступність технологій, навіть у країнах, що розвиваються. Співвідношення між інтернет-користувачами та мобільними телефонами показує, що більшість людей отримують доступ до інтернету через мобільні пристрої. Велика кількість користувачів соціальних мереж підтверджує, що вони стали ключовим способом комунікації, розваг і навіть роботи. Дані демонструють високий рівень цифрової інтеграції населення світу, що свідчить про активний розвиток технологій та їх вплив на суспільство.

Розглянемо динаміку розвитку використання інтернету користувачами (рис. 2).

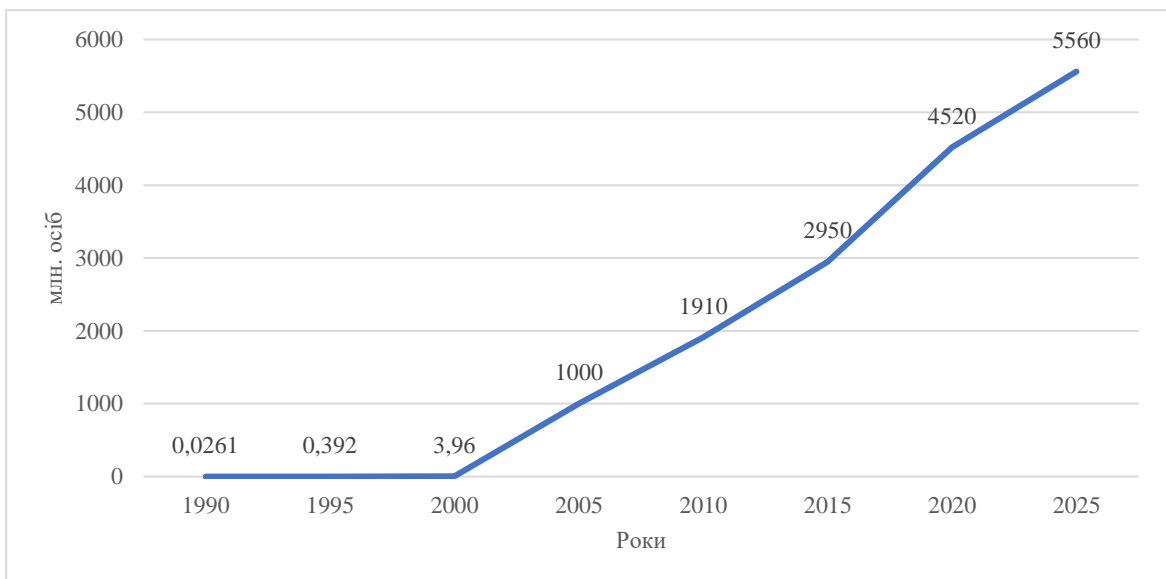


Рис. 2. Загальна кількість користувачів Інтернету у світі, млн. осіб [8]

Рис. 2 ілюструє зростання кількості користувачів Інтернету у світі з 1990 до 2025 року. У 1990 році кількість користувачів Інтернету була найменшою. До 1995 року кількість користувачів зростає до 0,392 млн осіб, що свідчить про розвиток Інтернету як інформаційної технології.

У 2000 році кількість користувачів зростає до 3,96 млн осіб, що відображає поступове впровадження Інтернету в суспільство. У період 2000-2015 спостерігається стрімке зростання користувачів інтернету. У 2005 році цей показник склав 1 млрд користувачів, у 2010 рік – 1,91 млрд користувачів, а в 2015 році – 2,95 млрд користувачів. У цей період розвиток мобільного Інтернету, соціальних мереж і зниження вартості підключення сприяли поширенню Інтернету в усьому світі.

У 2020 році кількість користувачів інтернету склала 4,52 млрд користувачів. На початок 2025 року цей показник сягнув 5,56 млрд користувачів. Зростання пов'язане з глобальною цифровою трансформацією, збільшенням доступу до технологій та поширенням Інтернету в країнах, що розвиваються [8].

З 2000 року розвиток технологій, доступність мобільних пристроїв та зниження цін на підключення сприяли масовій цифровізації. Розвиток мобільного Інтернету та соціальних мереж став ключовим фактором швидкого поширення Інтернету. Прогноз на 2025 рік свідчить про те, що цифровий світ продовжить розширюватися, і більшість населення матиме доступ до Інтернету.

Проаналізуємо основні цілі використання інтернету користувачами (рис. 3).

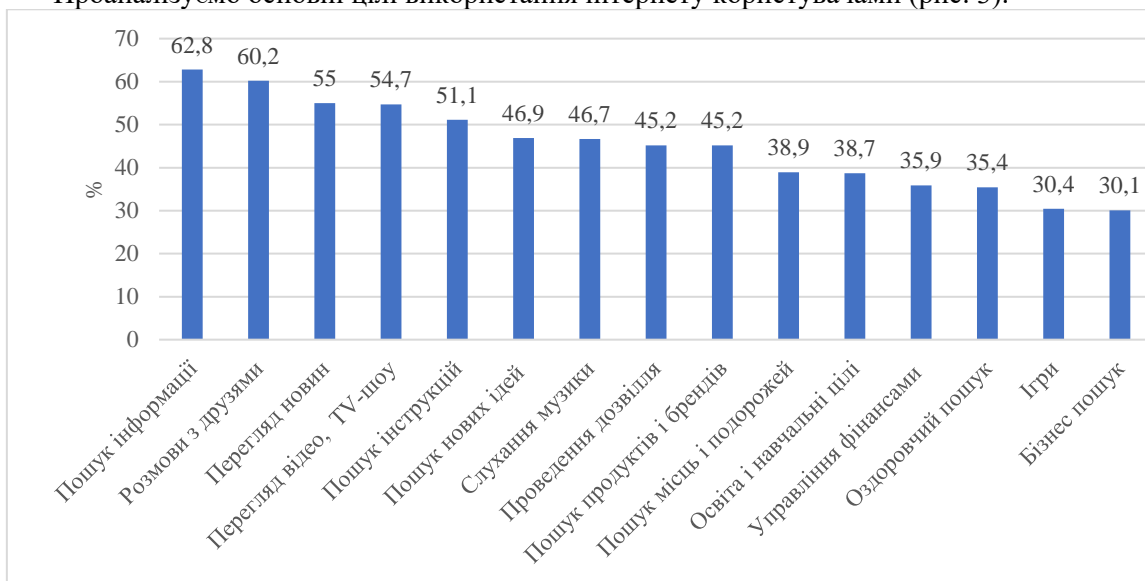


Рис. 3 Основні цілі використання інтернету користувачами [8]

Аналіз рис. 3 дозволяє зробити висновок, що основна частка користувачів використовує інтернет для пошуку інформації 62,8%, розмови з друзями і родиною 60,2% та перегляду новин 55% [8]. Також люди використовують Інтернет для спілкування через соціальні мережі, месенджери та електронну пошту, навчання за допомогою онлайн-курсів, вебінарів і освітніх платформ, роботи та бізнесу, включаючи віддалену зайнятість, онлайн-конференції та електронну комерцію. Інтернет є основним джерелом інформації, новин та розваг, таких як перегляд відео, музики, ігор і читання книг. Окрім цього, він допомагає у фінансових операціях, банкінгу, онлайн-покупках, бронюванні квитків і послуг, а також у розвитку творчості, самореалізації та веденні блогів.

Важливою технологією яка забезпечує доступ до інтернету є група супутників Starlink. Ця технологія забезпечує покриття більше ніж 100 країнам і територіям і також прагне забезпечити глобальний мобільний інтернет. Групою супутників управляє компанія Starlink Services, LLC, міжнародний телекомунікаційний провайдер, що є дочірньою компанією американської аерокосмічної компанії SpaceX. Starlink відіграє важливу роль у розвитку SpaceX [11].

Starlink став важливим інструментом для національної економіки у використанні в мирних цілях, забезпечуючи доступ до високошвидкісного інтернету в віддалених та слабо розвинених регіонах, де традиційні способи зв'язку можуть бути недоступні або надто дорогі. Це дозволяє людям, що живуть у віддалених районах, мати доступ до освіти, медичних послуг, інформації та інших необхідних ресурсів, що покращить їх якість життя та допоможе у розвитку економік цих регіонів. Також Starlink може стати важливим для вітчизняних корпорацій, забезпечуючи доступ до глобальних ринків і онлайн-сервісів. Starlink може сприяти розвитку, досліджень і співпраці між країнами в різних галузях науки, техніки та культури.

SpaceX почала запускати супутники Starlink у 2019 році. Станом на вересень 2024 року констеляція складається з понад 7 000 масово вироблених малих супутників на низькій орбіті Землі,

які спілкуються з наземними передавачами [7]. Планується розгортання майже 12 000 супутників, з можливим розширенням до 34 400. SpaceX оголосила, що в грудні 2022 року кількість абонентів перевищила 1 мільйон, а в вересні 2024 року досягла 4 мільйонів [10].

Космічний завод SpaceX, містить науково-дослідні, розробні, виробничі та орбітальні контрольні установи для Starlink. У травні 2018 року SpaceX оцінила загальну вартість розробки, будівництва та запуску констеляції на рівні не менше ніж 10 мільярдів доларів США. У 2022 році доходи від Starlink склали 1,4 мільярда доларів з невеликим прибутком, що з'явився лише в 2023 році. У травні 2024 року передбачалося, що доходи досягнуть 6,6 мільярда доларів США, а пізніше ця прогнозна цифра була підвищена до 7,7 мільярда. Очікується, що в 2025 році доходи сягнуть 11,8 мільярда доларів [10, 11].

Starlink широко використовувався в Російсько-українській війні, для чого був укладений контракт з Міністерством оборони США. Існує також військова версія Starlink, що називається Starshield, яка призначена для використання урядами.

SpaceX намагається мінімізувати вплив на астрономічні спостереження, вживаючи заходів для зниження яскравості супутників під час роботи. Супутники оснащені Hall-ефектними двигунами, що дозволяють їм підвищувати орбіту, утримувати її та здійснювати сплани на кінець свого терміну служби. Вони також спроектовані для автономного уникання зіткнень за допомогою даних про відстеження, що передаються з землі.

Пропонуємо впровадження корпоративного Starlink проекту в Україні як важливої складової розвитку інфраструктури для космічних місій в Україні, зокрема для Державного космічного агентства України. Державне космічне агентство України реалізує державну політику у сфері космічної діяльності [2].

Цей проект забезпечить реалізацію таких ключових аспектів і можливостей:

1. Забезпечення надійного зв'язку в реальному часі для космічних місій. Starlink здатен забезпечити стабільний високошвидкісний інтернет-зв'язок навіть у віддалених і важкодоступних регіонах, включаючи космічні місії. Для українського космічного агентства це може бути надзвичайно важливим інструментом для управління супутниками та іншими космічними апаратами в реальному часі.

2. Забезпечення зв'язку між центрами управління місіями на орбіті. Реалізація Starlink проекту дозволить підключитися до глобальної мережі для обміну даними з іншими агентствами, наприклад, NASA [9].

3. Покриття віддалених територій для наукових досліджень. Україна має ряд віддалених територій, таких як Антарктида, де проводяться наукові дослідження, а також проблеми з доступом до стабільного інтернету. Starlink може стати ідеальним рішенням для забезпечення миттєвого доступу до інтернет-ресурсів для українських вчених та дослідників. Він дозволить підключитися до баз даних, що зберігаються в реальному часі, для моніторингу експериментів та отримання даних під час космічних місій.

4. Мобільність і гнучкість для нових місій. Starlink може забезпечити мобільність і гнучкість у плануванні космічних місій, зокрема для запусків або випробувальних польотів. Якщо Україна планує запускати власні супутники або інші космічні місії, Starlink може бути корисним для: підключення в будь-якому місці для збору та аналізу даних. Він забезпечить інтернет-зв'язок для управління місією в режимі реального часу, навіть у разі відсутності стандартних наземних станцій зв'язку.

5. Міжнародна співпраця та координація. Оскільки Україна активно співпрацює з міжнародними космічними агентствами та приватними компаніями, Starlink може стати важливим інструментом для здійснення спільних місій, підключення до інтернаціональних мереж зв'язку. Реалізація Starlink проекту дозволить спростити обмін даними між українськими вченими та міжнародними колегами, розвинути спільні проекти з іншими країнами, які вже використовують Starlink.

6. Розвиток автономних космічних місій. В майбутньому для запуску автономних місій, наприклад, для дослідження Місяця чи Марса, Starlink може бути використано як частину інфраструктури зв'язку для підтримки місій. Супутники Starlink з низької орбіти можуть забезпечити стабільний зв'язок для: автономних космічних апаратів, які працюють на поверхні інших планет, це дозволить забезпечити прямий доступ до баз даних і управління космічними апаратами безпосередньо з центру в Україні.

7. Покращення навчання і підготовки космонавтів. При проведенні навчальних і тренувальних програм в Україні, що стосуються підготовки космонавтів та інших фахівців, Starlink може бути корисним для: онлайн-навчання та конференцій з іншими космічними агентствами. Він відкриє можливості для проведення практичних тренувань у будь-якій точці країни або світу, забезпечить тренувальні місії і комунікації з навчальними базами за кордоном.

8. Розвиток корпорацій. SpaceX і Starlink також можуть бути важливими для розвитку приватного космічного сектору в Україні. Компанії, які працюють у космічній галузі, можуть отримати доступ до інфраструктури зв'язку для своїх місій або для співпраці з іншими організаціями.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Розвинути використання Starlink для України можливо через державну підтримку ініціатив, зацікавленості та державних інвестицій в розвиток інфраструктури для підтримки українських місій, включаючи використання Starlink для зв'язку. Його варто інтегрувати з іншими супутниковими технологіями та супутниковими системами, які дозволять створити комплексну мережу, яка б покривала всі потреби космічного агентства. Спільні проекти з міжнародними партнерами та взаємодія з країнами, які вже використовують Starlink сприятиме спільному розвитку космічної інфраструктури.

Загалом, Starlink може стати важливим елементом, який забезпечить більш швидкий і доступний зв'язок для українських космічних місій та наукових досліджень, відкриваючи нові можливості для розвитку космічної галузі в Україні.

Список бібліографічного опису:

1. Грицюк Ю. І. Дяк Т. П. Застосування інтернет-технологій для організації навчального процесу у вищих навчальних закладах. Науковий вісник НЛТУ України, 2021. Т. 31, № 1. С. 137-146. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310123> (access date: 11.02.2025)
2. Державне космічне агентство України. URL: <https://www.nkau.gov.ua/ua/> (access date: 11.02.2025)
3. Калениченко Р. А., Коханець А. С. Сковира О. П. Особливості підтримки ділової репутації в мережі Інтернет. Вісник Національного університету оборони України, 2021. Вип. 2. С. 41-49. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnaou_2021_2_7 (access date: 11.02.2025)
4. Смерічевський С. Ф. Михальченко О. А. Трансформація економіки космосу: регулювання, функції, об'єкти, пріоритети. Економічний простір, 2022. № 178. С. 17-23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/178-3> (access date: 11.02.2025)
5. Baylor, M. With Block 5, SpaceX to increase launch cadence and lower prices, 2018. URL: (access date: 11.02.2025) <https://www.nasaspaceflight.com/2018/05/block-5-spacex-increase-launch-cadence-lower-prices/> (access date: 11.02.2025)
6. Maidenberg, M, Winkler, R. Starlink Surges but Is Still Far Short of SpaceX's Goals, Documents Show. The Wall Street Journal. 2023
7. Data Nasa Gov. URL: <https://data.nasa.gov> (access date: 11.02.2025)
8. Global Digital Reports. URL: <https://datareportal.com/> (access date: 11.02.2025)
9. NASA. URL: <https://www.nasa.gov> (access date: 11.02.2025)
10. SpaceX. URL: <https://www.spacex.com/> (access date: 11.02.2025)
11. Starlink. URL: <https://www.starlink.com/> (access date: 11.02.2025)

References:

1. Hrytsiuk, Yu. I., & Dyak, T. P. The use of internet technologies in educational process in higher education institutions. Scientific Bulletin of UNFU, 2021. 31(1), P. 137–146. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310123> (access date: 11.02.2025)
2. State Space Agency of Ukraine URL: <https://www.nkau.gov.ua/en/> (access date: 11.02.2025)
3. Kalenichenko R. Kokhanets A. Skovyra O. Features of supporting business reputation on the Internet. Bulletin of the National Defense University of Ukraine, 2021. Issue 2. P. 41-49. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnaou_2021_2_7 (access date: 11.02.2025)
4. Smerichevskiy S. F. Mykhalchenko O. A. Transformation of the space economy: regulation, functions, objects, priorities. Economic Space, 2022. No. 178. P. 17-23. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/178-3> (access date: 11.02.2025)
5. M. With Block 5, SpaceX to increase launch cadence and lower prices, 2018. URL: (access date: 11.02.2025) <https://www.nasaspaceflight.com/2018/05/block-5-spacex-increase-launch-cadence-lower-prices/>
6. Maidenberg, M, Winkler, R. Starlink Surges but Is Still Far Short of SpaceX's Goals, Documents Show. The Wall Street Journal. 2023.
7. Data Nasa Gov. URL: <https://data.nasa.gov> (access date: 11.02.2025)
8. Global Digital Reports. URL: <https://datareportal.com/> (access date: 11.02.2025)
9. NASA. URL: <https://www.nasa.gov> (access date: 11.02.2025)
10. SpaceX. URL: <https://www.spacex.com/> (access date: 11.02.2025)
11. Starlink. URL: <https://www.starlink.com/> (access date: 11.02.2025)

CONTENTS

INFORMATICS AND COMPUTER SCIENCE	
Samchuk L., Povstiana Y. Automation of the process of settlement in dormitories using the unified modeling language UML.	5
Prymyska S., Abramova A., Skladannyj D. Integration of Artificial Intelligence into Industrial Process Automation Systems.	12
Savka Ya., Kovivchak Ya., Dubuk V. Development of an automated system to support the activities of a youth centre.	21
Bautina M. Reliability Assessment and Failure Prediction of Submersible Pumps Using Advanced Modeling Techniques.	29
Korostin O. Optimising Machine Learning Integration in Real-Time Text Analytics Platforms: Technical Approaches and Performance Criteria.	38
Kravchuk Y. Ethical Implications of AI Applications in Nonprofit and Charity Sectors.	46
Buialo O., Zaitsev O. Analysis of the Possibilities of Using Digital Libraries in the Educational Process of Higher Military Educational Institutions.	53
Dobryshyn Yu. Classification and coding of software defects resulting from cyberattacks.	59
Kozak O., Mykhailova L., Semenyshyna I. Modeling and Simulation Tools for Studying Computer Networks: Overview and Practical Experience.	70
Mironov N., Samchuk L. Development of an application for interaction with a computer using gestures using Computer Vision technologies.	80
Moroz B., Shyshatskyi O. Classification of errors in geospatial databases based on the example data of the state land cadastre.	92
Mosiy L., Sverstiuk A. Methods of modeling and classification of electrocardiograms.	104
Nazaruk V., Shayniuk K. Threat model for the information security of the moodle distance learning system.	116
Polyakovska N. Towards a Practical Framework for LLMOps: Understanding and Building Operational Excellence for Large Language Models.	123
Pronina O., Synytsin R. Development of AI assistant for local user in Python programming language.	131
Shykerynets S., Ulichev O. Prospects for the Use of Machine Learning to Ensure Compliance of Software Products with State Regulatory Requirements.	136
Nikitin D., Rybitskyi O. Intelligent automated systems for processing and analysis of vehicle diagnostic data.	143
Prykhodchenko S., Prykhodchenko O., Shevtsova O. Software comparison of scientific article annotations using statistical natural language processing methods.	152
Piatykop O., Shevchenko A. Integrating API into Web Application for Collecting Music Data from Open Sources.	159

Pronina O., Reizhevskiy M. Programming A Game Application Using Artificial Intelligence.	165
Fedoniuk Y., Hlynchuk L. Patient Health Monitoring Using IoT Information Technology.	172
Horkunenko A., Sverstiuk A. Scientific and Analytical Study on the Application of Artificial Intelligence in Medical Imaging.	181
Markovskiy O., Nikolskiy S. Method for fast exponential on Galose Fields $GF(2^n)$ calculation for cryptographic applications.	188
PROJECT MANAGEMENT	
Vaskiv R., Veretennikova N. Chaos Engineering methodology and the resilience of distributed IT teams.	197
Kunanets N., Yarymovych Y. Creation of Smart Contracts in the Information System for Arms Sales Accounting.	212
Khilukha O. Corporate Governance in Starlink Projects.	225

ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ ТА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ СТАТЕЙ

- **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:**
 - 1) **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
 - 2) **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор,
 - 3) **виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**, котрим присвячується означена стаття;
 - 4) **формулювання мети дослідження** (постановка завдання);
 - 5) **виклад основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження, у тому числі з науковою новизною;
 - 6) **висновки та перспективи подальших досліджень** у даному напрямку.
- Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Вона повинна бути набрана у текстовому редакторі MS WORD. **Нумерацію сторінок** не виконувати. **Обсяг статті** 5 повних сторінок і більше (рекомендовано 5-12 ст.).
- **Параметри сторінки.** Верхнє та нижнє поле –1,5 см, лівє – 2,5 см, правє поле – 2 см. Від краю до верхнього колонтитула – 1,25 см, нижнього – 1,25 см. Дзеркальні поля. Папір розмір А4.
- У верхньому колонтитулі по центру шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом текст:

*Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво"
Луцьк, 202*. Випуск № ***
- У нижньому колонтитулі по лівому краю шрифтом Time New Roman розміром 10 пт з одинарним міжрядковим інтервалом прізвища авторів статті: @ Прізвище1 І.П., Прізвище2 І.П...
- **Шапка статті містить наступні рядки** шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюються по лівому краю:

DOI: (заповнюється редактором),
УДК: (заповнюється автором самостійно),
Прізвище, ім'я та по батькові 1 автора (напівжирним виділенням), вч.ступінь, вч.звання
ORCID 1 автора (у форматі <http://orcid...>),
Прізвище, ім'я та по батькові 2 автора (жирним накресленням), вч.ступінь, вч.звання
ORCID 2 автора (у форматі <http://orcid...>)
і т.д. (кількість авторів однієї публікації не більше 5)
Назва організації (у форматі- назва повністю, місто, країна)
- **Назва статті** розміщується через один рядок нижче назви організації (усі великі літери, розмір шрифту Time New Roman 11 пт з напівжирним виділенням та вирівнюванням по центру).
- **Анотації** (українською та англійською мовами) повинні містити прізвища та ініціали авторів, назву статті та короткий її зміст і розміщуються через один рядок нижче назви статті та набираються з абзацного відступу 1,25 см шрифтом Time New Roman розміром 9 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Кожна анотація обсягом 200 слів та формується одним абзацом. Нижче анотацій обов'язково вказуються **ключові слова** (кількість від 5 до 10). У англійській анотації вказуються прізвища та ініціали імені авторів (без по батькові).
- **Основний текст** статті розміщується через один рядок нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1,25 см шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюється по ширині.
- **Формули** набираються у редакторі формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Суг; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
- **Ілюстрації**, що присутні у статті, необхідно розташовувати у тексті по центру, вирівнюючи підписи по центру (Рис. 1. Назва). Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
- **Таблиці** потрібно розташовувати у тексті по центру, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею ставиться її порядковий номер і назва (Таблиця 1. Назва) та вирівнюється по ширині з абзацного відступу.

- **Посилання** на ту чи іншу роботу повинні позначатися в тексті у квадратних дужках за порядковим номером у списку літератури в кінці статті; посилання на джерела статистичних даних обов'язкові; посилання на публікації дослідників обов'язкові; посилання на власні публікації допускаються тільки у випадку крайньої необхідності.
- **Список бібліографічного опису та References.** У даному виданні не публікуються статті, що ґрунтуються на посиланнях країни-агресора. Список літератури («References») потрібно приводити повністю окремим блоком, повторюючи список літератури, який подається українською мовою, незалежно від того, є в ньому іноземні джерела чи ні. Тобто, після статті подається 2 списки: «Список бібліографічного опису» (звичайний список літератури) і «References» (список для міжнародних БД). Необхідно в опис джерела вносити всіх авторів, не скорочуючи їх до трьох, як це рекомендовано діючими у нас державними стандартами. References – повинен бути укладений англійською мовою або транслітерований. Рекомендуємо скористатись сервісом: <https://www.grafiati.com/uk/>. При оформленні інтернет-джерел задля запобігання довгих нерозривних лінків, користуйтеся сервісом скорочення URL-адрес, наприклад: <https://hyperhost.ua/tools/uk>
- В кінці статті вказується напрямок публікації відповідно до спеціальностей наукового журналу (у журналі виділено такі тематики досліджень: автоматика та управління, інформатика та обчислювальна техніка, телекомунікації та радіотехніка, управління проектами)
- **Стаття обов'язково переслається електронною поштою за адресою: cit@lntu.edu.ua**
- Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.
- **Усі рукописи проходять перевірку на плагіат!**

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів у науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» можна отримати у відповідального секретаря – к.т.н. Христинець Наталії Анатоліївни за тел. (0332) 74-61-15.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, ауд. 141

Автор статті отримує електронний примірник збірника.

Вартість однієї сторінки становить 40 грн. для працівників Луцького НТУ, 50 грн – для інших авторів. Окремо кожній статті присвоюється DOI (digital object identifier) – ідентифікатор цифрового об'єкту, що веде за собою додаткову оплату 60 грн за одну статтю.

Кошти можна перерахувати на рахунок: Луцький національний технічний університет <https://lntu.edu.ua/uk> – Онлайн оплата – Інші платні послуги – р/р UA86 820172 0 3132 4 1 002 2 02 017820 – призначення платежу: «За публікацію в журналі КІТ №п від _____ (ПІБ автора)» Без попереднього рецензування та перевірки на плагіат самостійно кошти на рахунок не надсилати.

Зразок оформлення статті на наступній сторінці

DOI:

УДК 004:02

Ковалець Віктор Геннадійович¹, д.т.н., професор

<https://orcid.org/2525-0006-0146-081X>

Золотар Ольга Петрівна², к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0005-0005-3007-2462>

Сулій Павло Павлович¹, магістрант

Ліпук Микола Сергійович², студент

¹Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

²Тернопільський національний технічний університет, м. Тернопіль, Україна

(якщо у статті усі автори з однієї організації, то верхні індекси (цифри) не потрібно, лише вказати під прізвищами одну назву ЗВО, місто та країну)

ПЕРЕХІД ВІД МОНОЛІТНОЇ ДО МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ: АПАРАТНІ МЕТОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ковалець В. Г., Золотар О.П., Сулій П.П., Ліпук М.С. Перехід від монолітної до мікросервісної архітектури: апаратні методи впровадження. У статті розглядається проблема переходу від монолітної архітектури до мікросервісної з розподіленою базою... (200 слів)

Ключові слова: монолітна архітектура... (5-10 слів)

Kovalets V., Zolotar O., Suliy P., Lipuk M. Transition from Monolithic to Microservice Architecture: Hardware Implementation Methods. The article addresses the problem of transitioning

Keywords: monolithic architecture

Постановка наукової проблеми. У сучасному світі інформаційних технологій, де системи постійно розвиваються та ускладнюються, питання ефективної архітектури та управління даними стає все більш актуальним.

Таблиця 1. Характеристики мікроконтролерів та апаратних шифраторів

Параметр	Криптографічні бібліотеки	Апаратні шифратори
Продуктивність	Помірна, залежить від потужності мікроконтролера	Висока, завдяки спеціалізованому обладнанню

Крім імпульсів керування транзисторів інвертора мікроконтролер виробляє імпульси керування транзистора VT37. Завдання транзистора VT37 полягає у підключенні гальмівного резистора R33 паралельно конденсатору фільтра C31 (рис. 2).

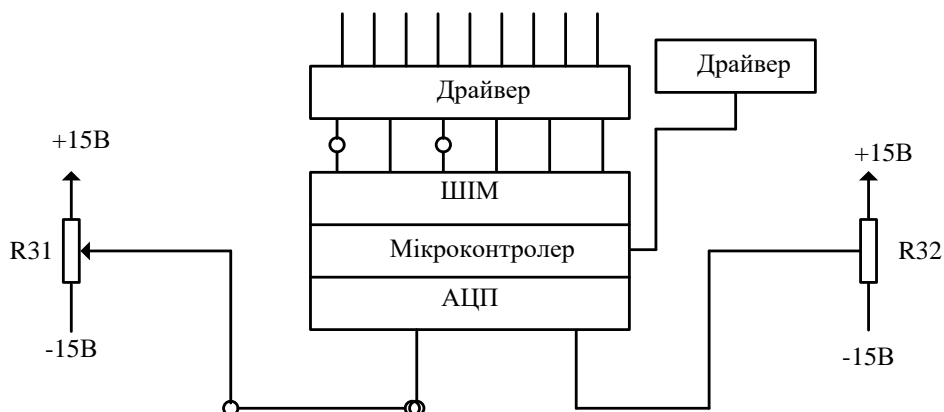


Рис.2. Схема підключення датчика частоти

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У даній статті було розглянуто проблему переходу від мікро-архітектури системи команд до мікро-архітектури спрощених вказівок...

Список бібліографічного опису:

1. Долгов О. М. Композиційні матеріали. Дніпро: Дніпр. політехніка, 2022. 67 с. URL: <http://surl.li/swvwq> (дата звернення: 16.03.2024).
2. Марчук В. Алгоритм оцінювання якості 3D моделі для адитивного виробництва. Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2023): Зб. наук. доп. міжнар. конф., м. Луцьк, 16–18 трав. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 178–180. URL: <http://surl.li/swwge> (дата звернення: 02.09.2024).

References:

1. Dolgov O. M. Composite materials. Dnipro: Dnipro. polytechnic, 2022. 67 p. URL: <http://surl.li/swvwq> (access date: 16.03.2024).
2. Marchuk V. 3D model quality assessment algorithm for additive manufacturing. Materials and technologies in engineering (MTI-2023): Collection. of science add. international conference, Lutsk, May 16–18. 2023. Lutsk, 2023. P. 178–180. URL: <http://surl.li/swwge> (access date: 02.09.2024).

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

КОЛЕКТИВ АВТОРІВ

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО**

Науковий журнал

Підп. до друку 20.03.2025. Формат А4. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 15.25 Обл. – вид. арк. 15.75
Тираж 20 прим. Зам. № 14/22

Комп'ютерний набір та верстка:

Н.А. Христинець

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і
радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа
(рішення №40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02456)
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75